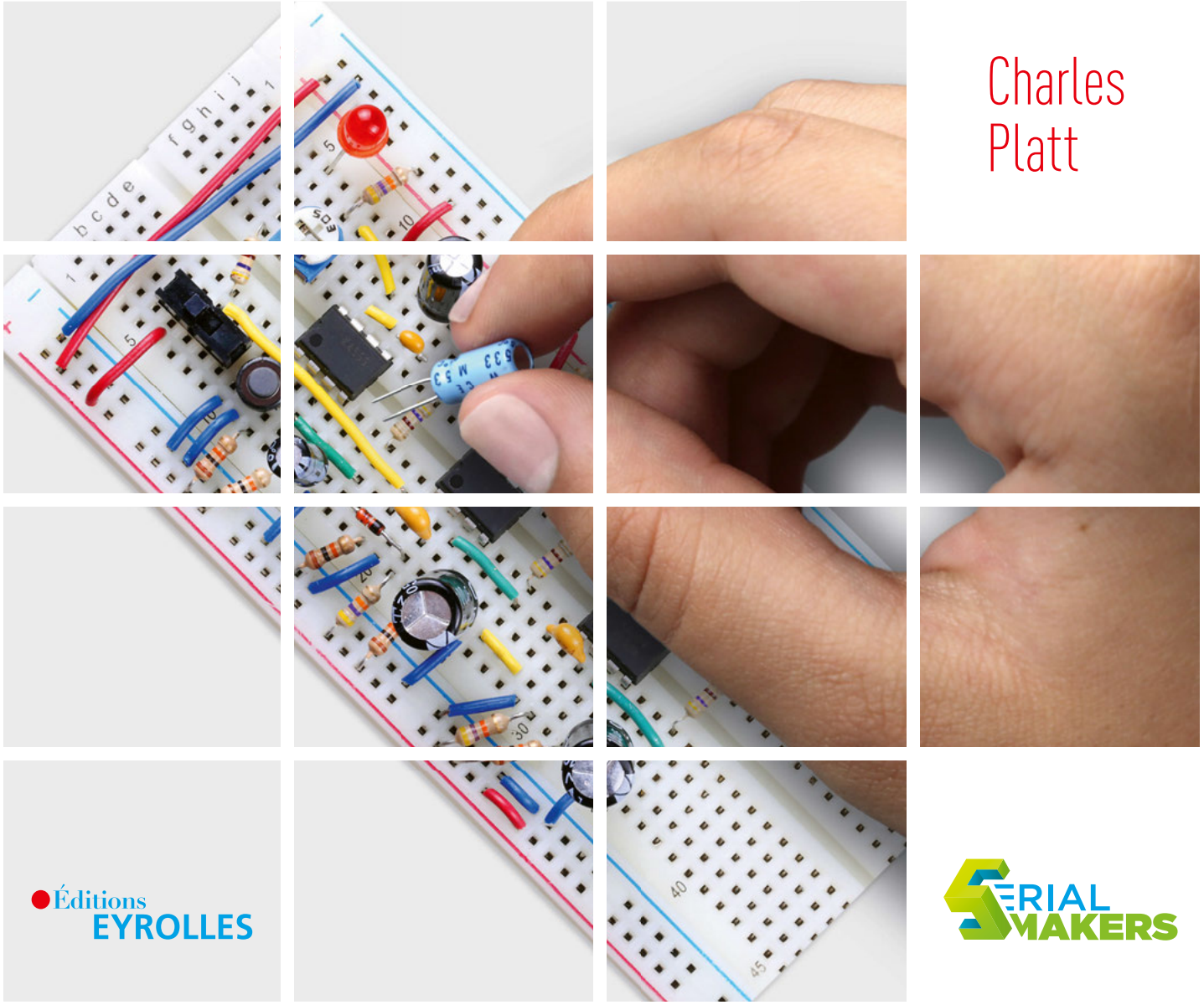
L'ÉLECTRONIQUE EN PRATIQUE

30 expériences ludiques

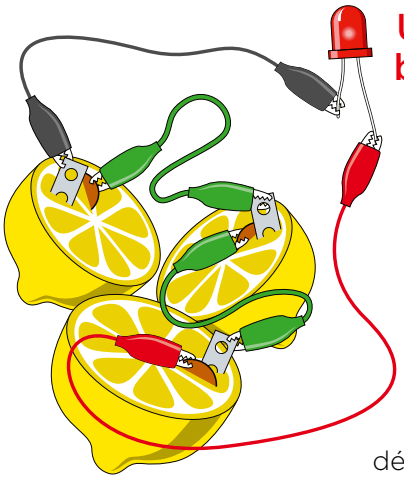
3e édition



Charles Platt

Éditions EYROLLES

SERIAL MAKERS



Un peu de théorie, beaucoup de pratique !

Vous souhaitez vous mettre à l'électronique, mais à condition de pratiquer tout de suite ? Vous voulez en connaître les grands fondements, mais sans risquer l'overdose de théorie ? Avec ce livre d'introduction, vous commencerez à monter des circuits simples dès la première page.

Grâce à 30 expériences ludiques, vous découvrirez les principaux concepts de l'électronique ainsi que ses composants les plus courants. En quelques heures, vous serez ainsi amené à fabriquer un testeur de réflexes, une alarme anti-intrusion et un verrou à combinaison, et à les modifier pour les perfectionner. Une fois familiarisé avec les notions de tension, courant, résistance, capacité et inductance, vous apprendrez comme fonctionnent les circuits logiques, les radios ou encore les microcontrôleurs.

Ces 30 projets tiennent sur une seule plaque de montage et la plupart ne nécessitent aucune soudure. Ils utilisent tous des tensions basses et sûres, fournies en général par une pile de 9 volts. Il vous arrivera peut-être de faire sauter un fusible, bourdonner un relais ou griller une diode, mais pas de panique car l'échec fait aussi partie de l'apprentissage !

Entièrement refondue et enrichie, la troisième édition de ce désormais best-seller a été actualisée avec les microcontrôleurs les plus récents. Amusant, inventif, foisonnant d'illustrations (plus de 500 photos, schémas et dessins), écrit dans un langage vivant et accessible, cet ouvrage remarquable met l'électronique à la portée de tous.

À qui s'adresse ce livre ?

- Aux électroniciens en herbe, amateurs, bricoleurs, bidouilleurs, geeks, étudiants, designers…
- À tous les makers de 10 à 99 ans qui souhaitent apprendre en pratiquant.

Charles Platt est rédacteur en chef de la revue américaine *Make:* et ancien contributeur du magazine *Wired*. Il est devenu accro à l'électronique après avoir fabriqué son propre répondeur téléphonique à l'âge de 15 ans. « C'est le livre que j'aurais aimé avoir quand j'étais ado » dit-il de cet ouvrage.

Make:

SERIAL MAKERS

Charles Platt

L'ÉLECTRONIQUE EN PRATIQUE

3e édition

Éditions EYROLLES

ÉDITIONS EYROLLES
61, bd Saint-Germain
75240 Paris Cedex 05
www.editions-eyrolles.com

Authorized French translation of the English edition of *Make: Electronics, 3rd Edition*, ISBN 978-1-680-45687-5 © 2021 Helpful Corporation. This translation is published and sold by permission of O'Reilly Media, Inc., which owns or controls all rights to sell the same.

Traduction autorisée de l'ouvrage en langue anglaise intitulé *Make: Electronics, 3rd Edition* de Charles Platt (ISBN : 978-1-680-45687-5).

Adapté de l'anglais par Jean Boyer.

Composition : Soft Office (38)

En application de la loi du 11 mars 1957, il est interdit de reproduire intégralement ou partiellement le présent ouvrage, sur quelque support que ce soit, sans l'autorisation de l'Éditeur ou du Centre français d'exploitation du droit de copie, 20, rue des Grands Augustins, 75006 Paris.

© fotosv / Shutterstock pour la photo page 141

© Charles Platt pour les autres photos et illustrations de la présente édition

© Éditions Eyrolles, 2023, ISBN : 978-2-416-00699-9

Cette troisième édition est dédiée à la mémoire de Hans Camenzind,
un brillant concepteur de circuits intégrés analogiques arrivé de Suisse
alors que naissait la Silicon Valley. Après avoir travaillé pendant quelque temps
chez Signetics, il quitta cette entreprise pour créer le Timer 555 à son propre compte.
Ce circuit intégré est devenu le plus utilisé dans l'histoire,
avec plusieurs milliards d'exemplaires produits en une cinquantaine d'années.
De nos jours, il est encore employé par presque tous ceux qui apprennent l'électronique.

Avant-propos

Comment s'amuser avec ce livre ?

L'électronique en pratique bouleverse l'apprentissage traditionnel. Au lieu de commencer par de la théorie, puis de la vérifier par une expérimentation, j'ai préféré commencer par une expérience, puis vous encourager à en comprendre la théorie. J'appelle cette approche « l'apprentissage par la pratique », et je l'apprécie pour deux raisons :

- Elle est plus intéressante.
- Elle se rapproche de la façon dont la science s'exerce dans le monde réel.

En sciences expérimentales, une observation peut conduire à une nouvelle compréhension d'un phénomène naturel. Pourquoi ne pas permettre à quelqu'un apprenant l'électronique de profiter d'une expérience similaire ? Découvrir comment les composants fonctionnent me semble plus intéressant que de le savoir avant de commencer.

Le seul inconvénient de mon approche est la nécessité de mettre en œuvre des projets. Heureusement, les fournisseurs de composants vous permettront de vous procurer tout ce qui est nécessaire à la réalisation de ces projets pour un coût modique.

Qu'y a-t-il de nouveau dans la troisième édition ?

Les deux premières éditions imprimées de *L'électronique en pratique* se sont vendues par milliers d'exemplaires et il en existe plusieurs traductions en langues étrangères. Même si j'ai été surpris et flatté de ce succès, je sais que mon livre ne continuera à se vendre que si je réponds aux besoins de mes lecteurs. C'est dans cet esprit que j'ai conçu cette troisième édition.

Dans cette nouvelle édition, la plupart des chapitres ont été réécrits, et de nombreux plans et schémas ont été mis à jour. Les listes des outils suggérés ont été actualisées, répondant ainsi aux remarques des lecteurs. Des photos plus parlantes ont été utilisées dans de nombreux cas. Certaines expériences ont été revues, en réponse aux retours des lecteurs. Certains projets ont été redéfinis pour que leurs circuits utilisent moins de composants, ce qui les rend plus faciles à comprendre.

Les trois derniers chapitres introduisant le microcontrôleur Arduino ont été revus et j'y ai ajouté une description des autres types de microcontrôleurs.

Objectifs de ce livre

Tout le monde utilise des appareils électroniques, mais peu de personnes savent ce qui se passe à l'intérieur.

Vous pouvez penser que vous n'avez pas besoin de savoir. Vous pouvez piloter une automobile sans savoir comment fonctionne son moteur thermique, alors pourquoi devriez-vous connaître l'électricité et l'électronique ?

En voici trois bonnes raisons :

- En découvrant comment fonctionne la technologie, vous êtes mieux armé pour contrôler votre environnement au lieu d'être contrôlé par celui-ci. Lorsque vous rencontrez des problèmes, vous pouvez les résoudre plutôt que de vous sentir frustré.
- Apprendre l'électronique peut être amusant si vous avez la bonne approche. De plus, c'est peu coûteux.
- La connaissance de l'électronique peut augmenter votre valeur dans votre travail, voire vous mener vers une nouvelle carrière.

Faire des erreurs

L'un des aspects importants de l'apprentissage par la pratique est qu'il faut vous attendre à commettre des erreurs. Un circuit peut ne pas fonctionner ou vous pouvez endommager des composants.

Je pense que c'est en fait un aspect positif car les erreurs sont un moyen efficace d'apprendre. Je veux que vous détruisiez des composants et que vous vous trompiez afin de découvrir par vous-même leurs comportements et leurs limites. Les tensions très faibles utilisées dans ce livre peuvent conduire à la destruction de composants mais elles sont sans risque pour vous.

Ne soyez jamais effrayé de faire des erreurs, les transistors et les LED sont des composants peu coûteux et faciles à remplacer.

Est-ce difficile ?

Je suppose que vous débutez sans connaissances préalables. En conséquence, les premières expériences sont extrêmement simples, vous n'aurez même pas besoin d'utiliser une plaque d'essais ou un fer à souder.

Je ne pense pas que les concepts soient difficiles à comprendre.

Si, en revanche, vous souhaitez étudier l'électronique de façon plus formelle et créer vos propres circuits, il s'agit d'un challenge plus important. Néanmoins, dans ce livre, j'ai réduit la théorie au minimum et les seules notions mathématiques que vous utiliserez sont les additions, soustractions, multiplications et divisions. Vous pourrez également trouver utile (mais pas indispensable) de savoir comment multiplier ou diviser par 10 en déplaçant la virgule d'une position à une autre.

Comment est organisé ce livre ?

La plupart des informations sont présentées sous forme de tutoriels, complétés par quelques sections de nature plus généraliste.

J'ai introduit les concepts et les thèmes de manière progressive. Vous pouvez lire le livre de façon aléatoire, mais les expériences d'un chapitre donné nécessitant les connaissances acquises dans les chapitres précédents, je vous recommande de les réaliser dans l'ordre de leur numérotation en en sautant le moins possible.

Si quelque chose ne fonctionne pas

Il n'y a en général qu'une seule façon de réaliser un circuit qui marche, alors qu'il y en existe des centaines qui l'empêcheront de fonctionner. La chance sera donc souvent contre vous si vous ne travaillez pas de manière méthodique.

Je sais combien il est frustrant quand les composants installés ne produisent pas l'effet escompté, mais si vous construisez un circuit qui ne fonctionne pas, s'en énerver est contre-productif. Le seul moyen d'identifier le problème est d'examiner chaque élément de façon systématique.

L'ensemble des expériences a été testé, ce qui me permet d'être certain que mes circuits sont corrects. Si quelque chose ne fonctionne pas, voici les causes les plus probables.

- Vous avez fait une erreur de câblage. Cela arrive à tout le monde ; j'en ai encore fait une aujourd'hui. Vous augmenterez vos chances de trouver l'erreur en vous éloignant de votre espace de travail pour une demi-heure pour faire autre chose avant de revenir effectuer une nouvelle observation.

- Vous avez peut-être surchargé un composant tel qu'un transistor ou un circuit intégré, ce qui l'a rendu inopérant. Pensez à disposer de pièces de rechange.

- Il se peut qu'il y ait une mauvaise connexion entre un composant et la plaque d'essais. Essayez de refixer les composants sur la plaque, mesurez les tensions et, si nécessaire, changez légèrement l'emplacement des composants essentiels sur la plaque d'essais.

Je donne d'autres conseils détaillés sur la recherche d'erreurs dans le livre.

Pour aller plus loin

Une fois que vous aurez terminé les projets de cet ouvrage, vous aurez acquis de nombreux concepts de base en électronique.

Si vous souhaitez en savoir davantage, mon livre *L'électronique en pratique 2* (en version e-book aux Éditions

Eyrolles) sera la suite idéale pour continuer. Son contenu est légèrement plus complexe, mais il utilise la même méthode d'apprentissage par la pratique. Mon objectif est que vous puissiez atteindre un niveau de compréhension intermédiaire en électronique.

Je ne suis pas qualifié pour écrire un guide de niveau avancé : en conséquence, je ne pense pas écrire un troisième livre qui pourrait s'intituler *L'électronique en pratique 3*.

Table des matières

Chapitre 1. Les bases **11**

Expérience 1. Goûtez à l'électricité ! 19

Expérience 2. Découverte du courant électrique 25

Expérience 3. Appliquons une pression 35

Expérience 4. Chaleur et puissance 45

Expérience 5. Fabriquons une pile 51

Chapitre 2. Principes de commutation **57**

Expérience 6. Connectons-nous 67

Expérience 7. Étude d'un relais 79

Expérience 8. Un oscillateur à relais 85

Expérience 9. Le temps et les condensateurs 99

Expérience 10. Un interrupteur à transistor 108

Expérience 11. Son et lumière 119

Chapitre 3. Soudage **133**

Expérience 12. Relier deux fils ensemble 142

Expérience 13. Faites surchauffer une LED 152

Expérience 14. Multivibrateur portable 154

Chapitre 4. Circuits intégrés **161**

Expérience 15. Génération d'une impulsion 166

Expérience 16. Créez un son 177

Expérience 17. Une idée alarmante 188

Expérience 18. Testeur de réflexes 204

Expérience 19. Apprenons la logique 216

Expérience 20. Un verrou électronique 227

Expérience 21. Une course de vitesse 238
Expérience 22. Commutation et rebonds 246
Expérience 23. Les dés magiques 250

Chapitre 5. Et après ? 265

Expérience 24. Autour du magnétisme 274
Expérience 25. Un générateur de tension 278
Expérience 26. Démonter un haut-parleur 285
Expérience 27. Faites réagir une bobine 289
Expérience 28. Une radio sans soudure ni alimentation 292
Expérience 29. Quand le matériel rencontre le logiciel 300
Expérience 30. Des dés plus sophistiqués 311
Pour aller plus loin 321

Annexe A. Spécifications du matériel 331

Annexe B. Achat du matériel 339

Index 343

Remerciements 352

Chapitre 1

Les bases

Ce chapitre comprend les expériences 1 à 5.

Dans l'expérience 1, je veux vous faire connaître littéralement le goût de l'électricité ! Vous expérimenterez le courant électrique et découvrirez la nature de la résistance électrique.

Dans les expériences 2 et 3, vous utiliserez un multimètre afin de mesurer l'intensité et la tension d'un courant électrique, et dans l'expérience 4, vous calculerez la puissance électrique. Au cours de cette expérience, vous pourrez griller une LED, faire fondre un fusible, et en déduire une loi fondamentale de l'électronique.

L'expérience 5 sera un divertissement utilisant des objets du quotidien pour générer de l'électricité sur votre table de travail.

Ces expériences permettront de clarifier certains concepts importants. Merci de les mettre en pratique avant de vous aventurer dans le reste du livre, même si vous avez des connaissances préalables.

Matériel du chapitre 1

Dans ce livre, chaque chapitre commence par des illustrations et la description des outils, équipements, composants et fournitures dont vous aurez besoin. Si vous manquez d'expérience pour acheter certains de ces matériels, vous trouverez davantage de détails dans l'annexe A, page 331. Si vous avez besoin de savoir où vous procurer composants et fournitures, en ligne ou en magasin, les lieux d'approvisionnements possibles sont répertoriés dans l'annexe B, page 339.

Le multimètre

Un *multimètre* portatif est l'outil essentiel pour apprendre l'électronique. Il vous indiquera ce qui se passe dans un circuit, tout comme un équipement IRM indique au médecin ce qui se passe à l'intérieur du corps humain.

Le préfixe « multi » dans multimètre signifie qu'il peut mesurer de multiples valeurs électriques, les plus importantes étant la tension, le courant (l'intensité) et la résistance électrique. Quand les électroniciens parlent d'un « multi », ils sous-entendent un multimètre. Au début, cela peut paraître compliqué, voire intimidant, mais en réalité c'est un appareil plus simple qu'un smartphone et pas plus difficile à utiliser qu'un appareil photo.

Le type d'appareil dont vous avez besoin est un *multimètre numérique*, utilisant un afficheur numérique. Vous trouverez parfois des *multimètres analogiques* dont la valeur mesurée est indiquée par une aiguille sur un cadran, mais ils ne sont pas d'un usage aussi facile et je ne vous les recommande pas.

Figure 1-1. *Un multimètre courant. Les carrés en fond mesurent 2,5 cm de côté.*

L'un des plus petits et plus simples multimètres que j'ai vus est représenté sur la figure 1-1. Si vous souhaitez minimiser vos dépenses, un tel appareil sera suffisant pour les expériences 1 à 30 et vous pouvez ignorer le reste de mes propos concernant les multimètres. Néanmoins, si vous souhaitez connaître les avantages dont vous pourriez bénéficier en dépensant un peu plus, lisez-les.

Automatique ou manuel ?

La fonction la plus importante dont vous bénéficierez avec un appareil plus coûteux est le *calibre automatique*. Pour l'expliquer, imaginez que vous souhaitiez mesurer une température. Si vous utilisez le thermomètre d'un four, vous serez satisfait de sa précision qui est de quelques degrés entre 100 et 300 degrés Celsius. Par contre, si vous voulez mesurer la température d'un malade, vous aurez besoin d'une précision de 0,1 degré Celsius pour une mesure s'étendant de 35 à 42 degrés.

La situation est la même en mesurant une tension ou une autre valeur électrique. Vous serez parfois intéressé par la mesure de faibles valeurs avec une grande précision, mais d'autres fois, vous mesurerez des valeurs plus importantes et accepterez une précision moindre.

Un *multimètre à calibre manuel* vous oblige à choisir une plage de mesures avant d'effectuer la mesure. Si par exemple vous voulez vérifier la tension d'une pile LR6 de 1,5 volts, vous devrez régler votre multimètre sur le calibre 2 volts, après quoi, le multimètre vous indiquera la tension de la pile avec une bonne précision.

Un *multimètre à calibre automatique* évaluera la tension et choisira lui-même le calibre le mieux adapté. Cela paraît séduisant, et les multimètres à calibre automatique deviennent de plus en plus abordables, mais personnellement, je ne les apprécie pas. Ce type de multimètre nécessite environ 2 secondes à chaque fois qu'il doit déterminer le calibre adéquat et je suis quelqu'un de plutôt impatient. De plus, du fait que vous ne choisissez pas le calibre, vous ne savez pas immédiatement la signification des nombres affichés. Supposons que vous voyez 1.48. S'agit-il de volts ou de millivolts ? L'afficheur montrera un petit mV ou V pour vous l'indiquer, mais si vous oubliez de regarder attentivement, des erreurs sont possibles.

> *Je vous suggère d'utiliser un multimètre à calibre manuel. Vous aurez ainsi peu de chances de commettre des erreurs, cela vous coûtera moins cher qu'un modèle à calibre automatique, et si comme moi vous êtes impatient, vous serez moins frustré.*

Comment savoir si l'illustration d'un site web représente un modèle à calibre manuel ou à calibre automatique ? Si un multimètre est à calibre automatique, c'est habituellement précisé dans sa description, cependant, en cas de doute, observez le bouton rotatif sur la face de l'appareil. Un modèle à calibre automatique aura une faible quantité d'indications et devrait ressembler à celui représenté sur la figure 1-2. Un multimètre à calibre manuel ressemblera à celui de la figure 1-3.

La suite de mes propos au sujet des multimètres se référera aux appareils à calibre manuel.

Figure 1-2. *Multimètre à calibre automatique.*

Figure 1-3. *Multimètre à calibre manuel.*

À quel prix ?

Conseiller quelqu'un sur le prix à mettre en achetant un multimètre est aussi difficile que de recommander l'achat d'une voiture. Le rapport entre le prix d'un véhicule le moins cher et celui d'un modèle plus sophistiqué est d'environ 100 : 1, il en est de même pour les multimètres. De plus, les prix évoluent avec le temps.

Pour répondre à cette question, je me réfère au multimètre de la figure 1-1 comme étant un *modèle de base*. Qu'allez-vous gagner à acheter un appareil qui coûte plus cher ?

Une réponse possible concerne sa longévité. Je n'ai pas utilisé ce type particulier de multimètre pendant une longue période mais de façon générale, les contacts du sélecteur rotatif en façade pourraient s'user avec le temps. Cela n'a peut-être pas d'importance pour vous si vous ne connaissez pas encore votre intérêt à long terme pour l'électronique.

Vous pouvez également disposer de plus de fonctions en dépensant davantage, mais c'est un sujet délicat car les fonctionnalités utilisent un vocabulaire précis. Je n'ai pas encore expliqué quoi que ce soit au sujet de la tension et l'intensité, et laissé de côté la vérification d'un transistor. Je vais vous montrer les symboles et abréviations que vous allez remarquer autour du bouton de sélection situé sur la face avant d'un multimètre, et je vous indiquerai les plus importants. Vous apprendrez leur signification par la suite en parcourant ce livre.

Sur la figure 1-4, les paramètres en rouge sont essentiels. Il est intéressant de connaître ceux en noir, mais ils ne sont pas primordiaux pour les expériences décrites dans ce livre.

Les fabricants de multimètres annoncent constamment de nouvelles fonctionnalités qui paraissent impressionnantes, mais la plupart ne sont pas d'une grande utilité. Voici quelques exemples de fonctionnalités dont vous n'avez pas réellement besoin :

- Mesure *sans contact*. Le multimètre peut indiquer si une tension est présente en l'approchant près d'une prise ou d'un conducteur électrique. Cela n'a aucune utilité pour *L'électronique en pratique*.
- Mesure de la *température*. Le multimètre peut indiquer si un composant surchauffe, mais en ce qui nous concerne, toucher un composant avec votre doigt suffira.

Positions sur le cadran			
V	Tension (potentiel électrique).	A	Intensité (courant électrique en ampères).
Ω	Résistance électrique (en ohms).	mA	Milliampères (millièmes d'ampère).
OU F	Capacité (en farads).	Hz	Fréquence d'un signal électrique (en hertz).
⎓	Courant continu (CC).	~	Courant alternatif (CA).
⊣|⊢	Test des diodes.	⊣|⊢	Test des piles.
OU	Test de continuité (l'appareil émettra un signal sonore).	hFE et/ou NPN PNP	Test des transistors.

Figure 1-4. *Symboles et abréviations d'un bouton de sélection d'un multimètre. Ceux en rouge sont essentiels.*

- Boutons *Max, Min et Hold* (maximum, minimum, maintien). Ils permettent de capturer des valeurs qui fluctuent rapidement mais vous n'aurez pas à le faire.
- *Rétroéclairage de l'affichage*. En général, en travaillant, vous utiliserez une lampe de bureau ce qui rend cette possibilité inutile.

Les six lettres et symboles de la moitié supérieure du tableau de la figure 1-4 sont souvent précédés d'un *multiplicateur*. Par exemple, **m** est un multiplicateur de valeur 1/1 000, ainsi le terme **mV** signifie 1/1 000e de volt, c'est-à-dire un *millivolt*. La lettre grecque **µ** (prononcée « micro ») est un multiplicateur de valeur 1/1 000 000, ainsi le terme **µA** signifie 1/1 000 000e d'ampère c'est-à-dire un *microampère*. Les multiplicateurs sont indiqués sur la figure 1-5.

Remarquez qu'une lettre minuscule **m** *signifie « diviser par 1 000 ». La lettre majuscule* **M** *signifie « multiplier par 1 000 ». Prenez garde à ne pas les confondre !*

En bas de la figure 1-5, j'ai indiqué des plages de mesures que vous pouvez trouver sur un multimètre. Certains multimètres n'utilisent pas de calibres commençant par 2. Leurs valeurs peuvent alors commencer par 4, comme par exemple 40, 400, 4K, et ainsi de suite. Certains appareils ont des calibres commençant par 6. Pour les projets de ce livre, je ne pense pas qu'il y ait une préférence à recommander.

Multiplicateurs			
p	« pico » 1/1 000 000 000 000	**m**	« milli » 1/1 000
n	« nano » 1/1 000 000 000	**k**	« kilo » x 1 000
µ	« micro » 1/1 000 000	**M**	« méga » x 1 000 000

Plages						
V (volts) CC	200m	2	20	200		
V (volts) CA	200m	2	20	200		
A (amps) CC	200µ	2m	20m	200m	10 ou 20	
A (amps) CA	200µ	2m	20m	200m	10 ou 20	
Ω (ohms)	200	2K	20K	200K	2M	20M
F (farads)	2n	20n	200n	2µ	20µ	200µ

Figure 1-5. *Plages et multiplicateurs fréquemment utilisés dans les multimètres.*

Il est appréciable de pouvoir disposer de nombreuses plages de mesures mais cela vous entraînera à dépenser davantage. Je pense que les valeurs en rouge sont les plus importantes alors que celles en noir sont optionnelles. En ce qui concerne la mesure des condensateurs **F** (farads), si votre multimètre ne la prévoit pas, les calibres indiqués sont sans objet ; par contre, si elle est incluse, il s'agit des valeurs que vous apprécierez de trouver.

Je vais maintenant vous montrer deux autres sélecteurs de multimètres pour illustrer comment les plages de mesures se présentent en réalité. Sur la figure 1-6, l'entourage circulaire du sélecteur est divisé en sections, chacune identifiée par une lettre ou un symbole tel que **V** ou **A**. **V** concerne la mesure des tensions. Cette zone s'applique à la fois à la mesure du courant alternatif **CA** (AC en anglais) ou continu **CC** (DC en anglais) par le biais d'un commutateur que j'ai entouré de rouge. Si vous ne connaissez pas la différence entre CC et CA, ce n'est pas important pour l'instant. Remarquez que la plage de mesures allant de 200 mV jusqu'au-delà de 200 V est meilleure que ce que je suggère sur la figure 1-5.

Observez le reste du cadran entourant le bouton sélecteur, vous constaterez que les fonctionnalités importantes de la figure 1-4 sont toutes présentes et que les plages sont complètes. Ce multimètre paraît être un bon choix.

Figure 1-6. *Cadran sélecteur d'un multimètre capable d'effectuer toutes les mesures que je pense être nécessaires dans ce livre.*

Observez maintenant la figure 1-7. Ce multimètre ne possède pas d'interrupteur pour choisir les mesures CA ou CC. À la place, le sélecteur propose des positions dédiées. Sur la gauche, vous voyez la lettre **V** avec le symbole signifiant CC (courant continu). Sur la droite, une autre lettre **V** est placée à côté d'une ligne ondulée indiquant la mesure de courant alternatif (CA) qui se réfère aux deux positions blanches à sa gauche.

Le symbole de l'éclair signifie « attention » car vous devriez prendre des précautions si vous envisagez de mesurer une tension de 600 volts, mais à vrai dire, je ne vois pas dans quelles circonstances vous auriez un tel besoin. Les faibles

tensions sont plus importantes dans notre cas et ce multimètre ne possède pas de plage pour la mesure de faibles tensions alternatives. Cela ne me satisfait pas car vous pourriez parfois avoir à mesurer des tensions fluctuantes, à la sortie d'un circuit intégré **timer** par exemple.

Je ne vois aucune position permettant la mesure d'intensités CA. Il y a la lettre **A** suivie du symbole pour le courant continu, mais pas de lettre **A** suivie de la ligne ondulée. C'est un peu dommage.

Une autre faiblesse de ce multimètre est l'absence de mesure des condensateurs en farads. Mais attendez, ne serait-ce pas cette lettre **F** que j'ai entourée en rouge ? Non, il y a un symbole degré à ses côtés, cela signifie donc qu'il peut mesurer des températures en « degrés Fahrenheit ». C'est trompeur, d'autant plus que ce multimètre n'est pas fourni avec la sonde de température nécessaire, vous ne pouvez donc pas utiliser cette possibilité.

Pour terminer, j'ai entouré **2M** qui est la limite haute pour la mesure des résistances électriques. À vrai dire, une limite de **20M** aurait été préférable.

Figure 1-7. *L'observation de ce multimètre révèle que certaines fonctionnalités souhaitables ne sont pas présentes. Voir le texte pour davantage de détails.*

Finalement, je ne suis pas enchanté par ce multimètre. Vous pourriez l'utiliser pour les expériences de ce livre mais il est plus coûteux que le modèle de base de la figure 1-1 et n'offre pas de possibilités significatives justifiant cette différence.

Combien êtes-vous disposé à dépenser ? Cherchez en ligne un multimètre comparable au modèle de base de la figure 1-1, et quel que soit son prix, considérez ce montant comme prix plancher de base B €. Si vous dépensez entre deux et quatre fois B €, vous devriez pouvoir disposer de toutes les fonctionnalités que j'ai recommandées. Le multimètre de la figure 1-3 que je me suis procuré afin de l'évaluer quand j'écrivais ce livre coûte environ B € × 3 et se comporte correctement. Si on augmente un peu plus le budget, le multimètre à calibre automatique de la figure 1-2 coûte B € × 6.

Figure 1-8. *Ce modèle coûte environ 20 fois plus cher que celui de la figure 1-1.*

Sur la figure 1-8, se trouve le multimètre que je préfère à l'heure où j'écris ces lignes. Remarquez qu'il affiche 4 chiffres. Certains multimètres moins coûteux affichant également 4 chiffres commencent à être disponibles, mais un chiffre supplémentaire ne signifie pas que les circuits internes du multimètre sont dix fois plus précis qu'un multimètre affichant 3 chiffres. Vous devez comparer attentivement les spécifications des fabricants pour vous en rendre compte. Pour les besoins des projets de ce livre, une précision de 4 chiffres n'est pas nécessaire. Le seul problème du multimètre de la figure 1-8 est son coût de B € × 20 environ. Je le considère comme un investissement à long terme. Je suis satisfait de sa précision et j'espère qu'il me fera bon usage pour de nombreuses années, mais ces considérations ne sont pas importantes si vous ne savez pas encore à quel point l'électronique vous passionnera.

Si vous avez lu toutes les suggestions précédentes mais restez indécis au sujet du modèle à acheter, continuez la lecture de ce livre afin d'avoir une idée de la façon dont un multimètre est utilisé dans les expériences 1, 2, 3 et 4. Prenez alors votre décision.

Cela conclut mes réflexions au sujet des multimètres. Les autres décisions d'achat qui vous attendent seront plus faciles à prendre.

Lunettes de sécurité

Il y aura parfois un léger risque pour vos yeux quand vous travaillerez sur des projets électroniques. Par exemple, quand vous devez couper un petit morceau de fil conducteur pour le relier à un composant comme une LED, un fragment pourrait atteindre votre visage.

N'importe quelle paire de lunettes de protection de coût modéré apportera une protection adéquate. Une paire de lunettes de vue est une alternative acceptable. La figure 1-9 montre des lunettes de sécurité usuelles.

Figure 1-9. *Lunettes de sécurité.*

Fils de tests pour connexions expérimentales

Vous utiliserez des *fils de tests* pour relier les composants dans les premières expériences. Le type de fil auquel je me réfère est à *double terminaison*. Évidemment, n'importe quel fil possède deux extrémités ? En effet mais dans ce cas, je veux dire que chaque extrémité est équipée d'une *pince crocodile* comme le montre la figure 1-10. Chaque pince munie d'un ressort permet de réaliser une connexion électrique en s'agrippant solidement à un composant, libérant ainsi vos mains pour toute autre action. Pour les expériences de ce livre, des fils assez courts tels que ceux de l'illustration conviendront. L'utilisation de câbles plus longs est également possible, mais ils auront tendance à s'emmêler. Par contre, vous ne devez pas utiliser de fils munis d'une petite broche à chaque extrémité appelés *fils de pontages.*

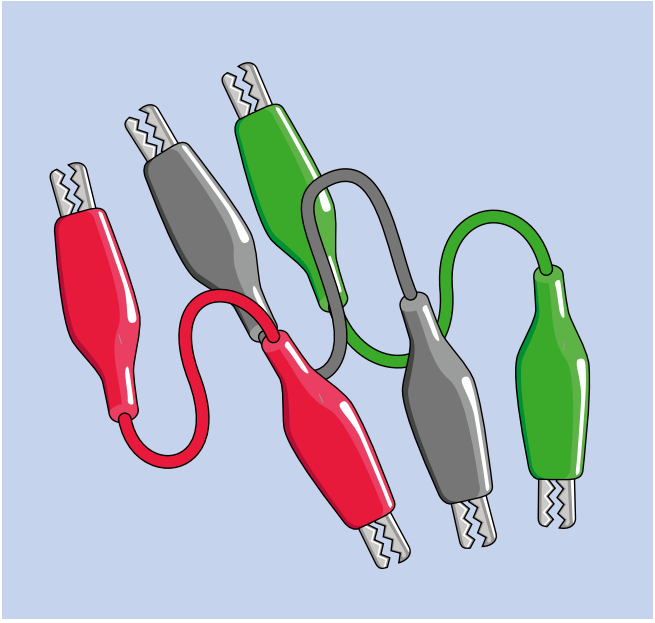


Figure 1-10. *Fils de tests.*

Alimentation électrique

Pratiquement toutes les expériences de ce livre utilisent une source d'alimentation de 9 volts. Vous pouvez obtenir cette tension à partir d'une *pile alcaline de 9 volts* telle qu'on en trouve dans les grandes surfaces et boutiques d'accessoires. Il n'est pas nécessaire qu'elle soit d'une marque connue. Pour la suite, je vous recommanderai l'utilisation d'un *adaptateur secteur*, mais vous n'en avez pas besoin pour l'instant.

Connecteur de pile (optionnel)

Mes illustrations montreront des fils de tests reliés aux bornes d'une pile de 9 volts, mais si vous souhaitez disposer d'une connexion de meilleure tenue, vous pouvez acheter un connecteur de pile qui se clipse sur les bornes de votre pile et disposent de deux fils aux extrémités dénudées comme sur la figure 1-11.

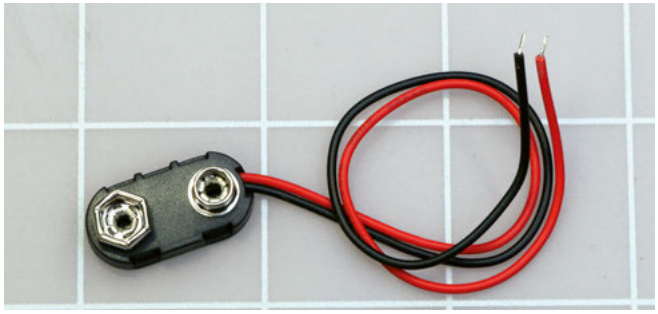


Figure 1-11. *Connecteur d'une pile de 9 volts.*

Fusible

Un *fusible* interrompt un circuit si un courant électrique trop intense le traverse. Vous aurez besoin d'une paire de fusibles à cartouche en verre tels que ceux de la figure 1-12, mais vous pouvez également employer des fusibles utilisés dans les automobiles, disponibles chez les revendeurs d'accessoires auto. Quel que soit votre choix, vous aurez besoin d'un fusible de calibre 1 ampère et un autre de calibre 3 ampères (les fusibles à cartouches auront respectivement une inscription 1A ou 3A sur leur extrémité métallique).

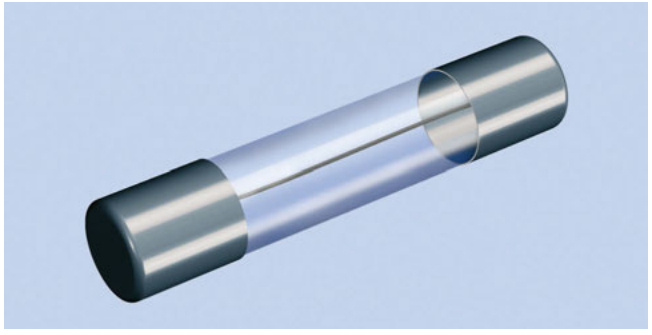


Figure 1-12. *Vue rapprochée d'un fusible de type 2AG de diamètre 5 mm.*

Cette illustration représente une vue rapprochée d'un fusible de type 2AG d'un diamètre de 5 mm. Les fusibles à cartouches sont en général prévus pour une tension d'utilisation de 250 volts mais tout modèle prévu pour une tension de service supérieure à 10 volts conviendra (le terme «**tension de service**» correspond à la tension maximale que le fabricant recommande pour ce composant).

Diodes

Plus communément appelées *LED*, elles se présentent sous diverses formes et dimensions. Celles que je vais utiliser sont de type «voyants à LED» et sont souvent désignées comme *LED standard traversantes* dans les catalogues. Dans les deux premiers chapitres de ce livre, des LED de diamètre 5 mm seront faciles à manipuler, mais je recommande d'utiliser des LED de 3 mm de diamètre qui seront plus faciles à insérer dans les circuits dans lesquels les composants sont regroupés ensemble. Une LED classique de couleur rouge est représentée sur la figure 1-13.

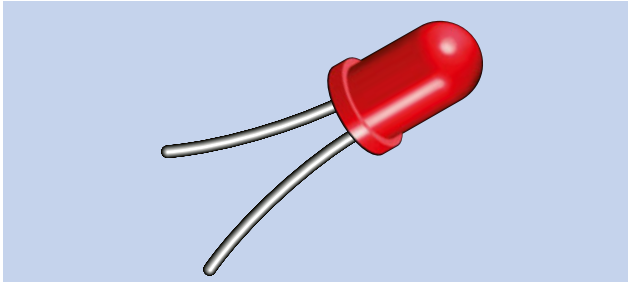


Figure 1-13. *Vue rapprochée d'une LED rouge traversante.*

Dans ce livre, je me référerai souvent à des *LED rouges génériques*. Je souhaite qu'elles soient rouges car les LED rouges utilisent moins de courant et une tension plus faible que les LED de certaines autres couleurs, ce qui est important dans certaines expériences.

Le terme générique signifie les moins chères communément disponibles. Elles sont utilisées dans beaucoup d'applications, c'est pourquoi il est pratique d'en posséder au moins une douzaine.

Certaines LED génériques, incorporées dans un *boîtier incolore transparent* en plastique ou résine, peuvent surprendre en émettant une lumière colorée quand elles sont

alimentées. D'autres LED, comme celle représentée sur la figure 1-13, sont appelées ***diffuses*** car elles sont encapsulées dans un corps en plastique ou résine de couleur identique à celle de la lumière émise. À caractéristiques identiques, les LED à corps transparent sont plus brillantes, mais les LED diffuses sont plus agréables au regard.

Résistances

Vous aurez besoin d'une variété de ***résistances*** afin de contrôler les tensions dans diverses parties d'un circuit. Deux résistances sont représentées en vue rapprochée sur la figure 1-14 (en réalité, elles ont une longueur inférieure à 12,5 mm). J'expliquerai par la suite comment les anneaux colorés indiquent la valeur de chaque résistance. La couleur du corps d'une résistance est sans importance dans notre cas. Si vous achetez vos résistances, elles sont si peu coûteuses qu'il serait dommage de ne sélectionner que les deux ou trois valeurs utilisées dans un projet. Procurez-vous plutôt un assortiment préconditionné chez un revendeur ou sur eBay. Si vous souhaitez connaître exactement les valeurs nécessaires pour chaque expérience de ce livre, reportez-vous aux tableaux de l'annexe A.

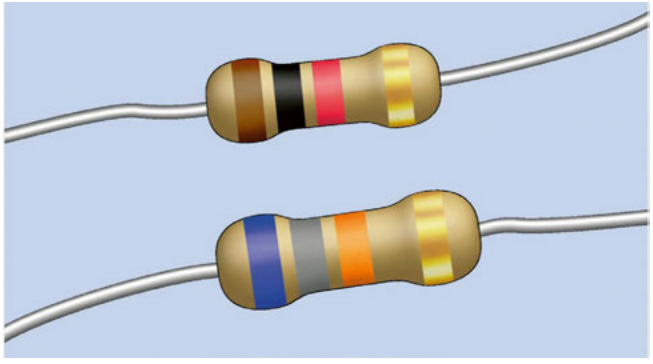


Figure 1-14. *Deux exemples de résistances.*

Petites fournitures

Dans l'expérience 5, je vous montrerai comment réaliser une pile à jus de citron. Pour ce petit projet, vous aurez besoin de pièces de monnaie en cuivre (ou un quelconque objet ayant une surface cuivrée), et également d'une plaque recouverte de zinc telle qu'une plaque d'assemblage d'environ 25 mm de longueur comme celle de la figure 1-15. Quatre suffiront, des petits colliers pourront également convenir. Vous en trouverez dans toutes les grandes surfaces de bricolage. En ce qui concerne les pièces de monnaie, de nouvelles pièces seront plus efficaces que des pièces usées qui seraient oxydées. Si vous habitez un pays où des pièces cuivrées ne sont pas utilisées, je vous suggère quelques alternatives dans le guide de l'annexe A.

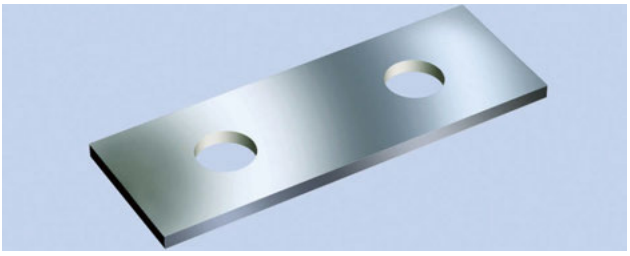


Figure 1-15. *Plaque d'assemblage zinguée. Essayez de vous procurer des plaques d'environ 25 mm de longueur. Des colliers pourront également convenir.*

Carnet de notes de l'expérimentateur

Chaque fois que vous réalisez une expérience, vous avez besoin de conserver la description de la façon dont vous l'avez mise en œuvre et de ce qui s'est passé. Vous pouvez prendre vos notes avec un ordinateur ou votre smartphone, mais un bon vieux carnet de notes présente certains avantages. Vous n'avez pas besoin d'ouvrir une application pour mettre à jour vos informations et il évite les pertes accidentelles de données. Conservez-le sur un coin de votre table de travail, il vous apparaîtra plus utile que vous ne le pensiez.

C'était le dernier sujet de ma liste, alors commençons les expériences maintenant !

Expérience 1
Goûtez à l'électricité !

Pouvez-vous goûter à l'électricité ? C'est tout comme ! En faisant le test de la langue avec une pile, ce projet va démontrer ce qu'est la résistance électrique.

Vous aurez besoin de :

- 1 pile alcaline de 9 volts
- 1 multimètre

Et c'est tout !

Attention : pas plus de 9 volts

Une pile alcaline de 9 volts ne vous provoquera aucun choc électrique. Mais *n'essayez pas* cette expérience avec une pile de tension plus élevée, et *n'utilisez pas* une batterie plus grosse pouvant délivrer un courant plus important. N'utilisez absolument pas une batterie de voiture ou de système d'alarme ! De même, si vous avez des prothèses ou des bagues métalliques dans votre bouche, ne les mettez pas en contact avec la pile.

Testez votre langue

Humidifiez votre langue et mettez son extrémité en contact avec les bornes de votre pile de 9 V, comme le montre la figure 1-16. (Votre langue n'est probablement pas aussi grosse que celle de l'illustration. La mienne ne l'est pas. Cette expérience devrait fonctionner quelle que soit la taille de votre langue.)

Ressentez-vous un picotement ? Maintenant éloignez-vous de la pile, essuyez votre langue et asséchez son extrémité très fortement à l'aide d'un mouchoir. Touchez à nouveau la pile avec votre langue, vous devriez ressentir un picotement beaucoup plus faible.

Que se passe-t-il si vous ne ressentez rien ? Certaines personnes semblent avoir une peau inhabituellement épaisse, ou une langue sèche, peut-être les deux. Quelques-unes m'ont écrit ces dernières années pour m'informer qu'ils ne ressentaient aucun picotement. Si vous avez ce problème, faites dissoudre une pincée de sel dans quelques centilitres d'eau et humidifiez votre langue avec. Cela devrait résoudre cette difficulté !

Que se passe-t-il ? Vous pouvez utiliser un multimètre pour le savoir.

Figure 1-16 *Un bricoleur intrépide évalue les caractéristiques d'une pile alcaline de 9 V.*

Réglez votre multimètre

Si vous avez un multimètre neuf, une pile est-elle préinstallée ? Choisissez une fonction avec le bouton de sélection et attendez pour voir si le cadran affiche une valeur numérique. Si le cadran reste blanc, il vous faudra ouvrir le multimètre et y insérer une pile avant de pouvoir l'utiliser. Je ne peux pas vous indiquer ici comment faire, ni le type de pile nécessaire, car tous les multimètres ont des

procédures différentes. Vous devez consulter la notice qui a dû vous être fournie.

Les multimètres sont fournis avec deux fils, un rouge et un noir. J'y ferai référence en tant que *cordons de mesures* pour les différencier des autres fils de tests que vous allez également utiliser.

En fait, le mot « fil » se réfère à tout conducteur se connectant à un composant ou un appareil.

Chaque cordon d'un multimètre possède une fiche de connexion à une extrémité et une sonde pointue en acier (pointe de touche) à son autre extrémité, comme le montre la figure 1-17. Vous devez insérer les fiches dans le multimètre et vous servir des pointes de touche aux endroits d'un circuit où vous souhaitez savoir ce qui se passe. Les sondes peuvent mesurer un courant électrique ou détecter une tension. Les projets de ce livre mettent en jeu des tensions et intensités si faibles que la manipulation des sondes ne peut pas représenter un danger (sauf si vous vous piquez la peau avec leurs extrémités pointues).

Vous pouvez vous procurer accessoirement d'autres types de cordons de mesures. Certains sont très courts, et certains autres ont des pinces crocodiles ou des *grip-fils* à leurs extrémités. Personnellement, j'aime les cordons courts et les grip-fils, mais par défaut, les multimètres sont vendus avec cordons de mesure comportant des pointes de touche.

Maintenant, voyons où insérer vos cordons de mesure dans votre multimètre ?

Ce n'est pas aussi simple qu'il paraît.

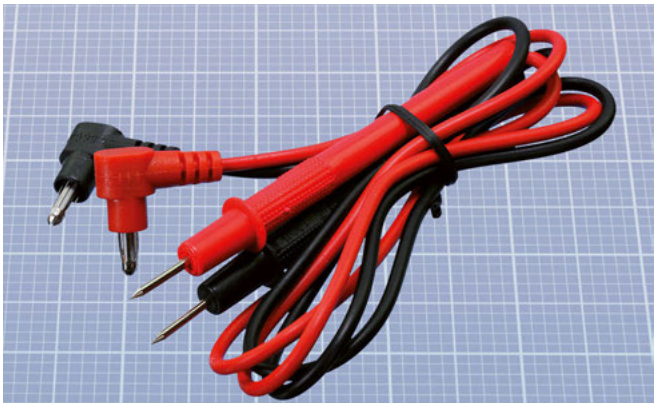


Figure 1-17. *Cordons de mesure standards. Les grands carrés en fond mesurent 2,5 cm de côté.*

Je vais tout d'abord commencer par le fil noir qui est facile à connecter dans la borne de votre multimètre identifiée par **COM** ce qui signifie *commun* pour toutes les mesures. Après avoir connecté le fil noir, vous ne devriez jamais avoir à le retirer.

Une autre borne devrait être identifiée par la lettre **V** ainsi que par le symbole grec nommé *oméga*, qui correspond à celui de la figure 1-18 et représente la mesure des résistances électriques.

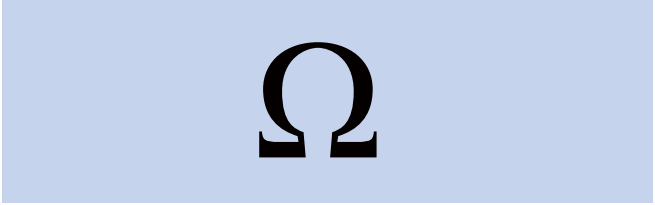


Figure 1-18. *La lettre grecque oméga représente les unités de résistance électrique.*

La borne peut être accompagnée d'autres symboles à ses côtes, mais les symboles V et oméga sont toujours présents, indiquant que cette borne de connexion est utilisée pour la mesure des résistances électriques et des tensions. Insérez le fil rouge dans cette borne. Aidez-vous des figures 1-19 et 1-20.

Vous pouvez voir une troisième borne identifiée par **mA** signifiant mesure des *milliampères*. J'y reviendrai ultérieurement. Vous devriez également trouver une quatrième borne marquée 10A ou 20A, signifiant 10 ampères ou 20 ampères. J'y reviendrai également par la suite. N'utilisez pas ces bornes de connexion pour le moment.

Figure 1-19. *Bornes de connexion des cordons de mesures.*

Figure 1-20. *Multimètre différent, les bornes de connexions sont identiques.*

Ohms	Kilo-ohms	Mégaohms
1 Ω	0,001K	0,000001M
10 Ω	0,01K	0,00001M
100 Ω	0,1K	0,0001M
1 000 Ω	1K	0,001M
10 000 Ω	10K	0,01M
100 000 Ω	100K	0,1M
1 000 000 Ω	1 000K	1M

Figure 1-21. *Tableau de conversion des valeurs de résistances.*

Fondamentaux : qu'est-ce que la résistance ?

La résistance électrique permet de réduire l'intensité d'un courant électrique qui la parcourt.

Pratiquement toutes les substances existantes possèdent une résistance, y compris votre langue.

On mesure les distances en kilomètres, les masses en kilogrammes et les températures en degrés centigrades. De façon similaire, on mesure la résistance électrique en *ohms*, une unité internationale utilisée en hommage à Georg Simon Ohm, qui était un pionnier de l'électricité.

Le symbole grec Ω de la figure 1-18, indique des ohms. Cependant, pour des résistances supérieures à 999 Ω, la lettre majuscule K est utilisée, signifiant *kilo-ohm* (ou *kilohm*) et équivalant à un millier d'ohms. Parfois, la lettre K est suivie du symbole oméga pour que les indications soient claires, mais c'est rarement le cas. Par exemple, une résistance de 1 500 Ω sera notée 1,5K. Au-dessus de 999 999 Ω, la lettre majuscule M est utilisée, signifiant *mégaohm* (ou *mégohm*), représentant un million d'ohms et souvent appelée *meg* dans le langage technique courant. Si quelqu'un parle d'une résistance de deux virgule deux megs, sa valeur sera 2,2M.

```
1K = 1000 ohms

1M = 1000K = 1000000 ohms
```

La figure 1-21 contient un tableau de valeurs intermédiaires.

En Europe, les lettres R, K ou M se substituent à la virgule, afin de réduire le risque d'erreurs. Ainsi, dans un schéma de circuit européen, 5K6 signifie 5,6K, 6M8 signifie 6,8M et 6R8 signifie 6,8 Ω. Je n'utiliserai pas cette notation dans ce livre, mais vous pourrez la rencontrer dans certains schémas provenant d'autres sources.

Un matériau qui présente une résistance très élevée au passage du courant électrique est appelé un *isolant*. La plupart des plastiques ainsi que les gaines colorées des câbles sont des isolants.

Un matériau ayant une résistance très faible est un *conducteur*. Les métaux tels que le cuivre, l'aluminium, l'argent et l'or sont d'excellents conducteurs.

Votre langue est-elle un isolant ou un conducteur ?

Nous allons le déterminer.

Résistance de votre langue

Observez le commutateur rotatif de votre multimètre, vous devriez trouver au moins une position identifiée par le symbole oméga Ω. Sur un multimètre à plage automatique, pointez le bouton vers le symbole Ω comme le montre la figure 1-22, appliquez délicatement les pointes de touche sur votre langue et attendez que le multimètre choisisse automatiquement la plage de mesures. Vérifiez l'apparition de la lettre K sur l'écran.

Sur un multimètre manuel, vous devez choisir la plage de mesures appropriée. Pour cela, vous devez définir la valeur maximum que vous devez mesurer. Pour votre langue,

vous choisirez probablement 200K ou 400K (200 000 Ω ou 400 000 Ω). Observez les vues rapprochées des multimètres sur les figures 1-23 et 1-24.

Que va-t-il se passer si votre langue a une résistance supérieure à 200K ? Un multimètre manuel affichera un message d'erreur qui est en général **OL** (« Open Leads », c'est-à-dire comme si les cordons de mesure n'étaient pas reliés). Que devez-vous faire ?

Tournez simplement le bouton sélecteur sur la valeur maximale de mesure suivante, par exemple 2M. Votre langue n'aura probablement pas une résistance supérieure.

Si vous voyez **OL**, *choisissez un calibre différent.*

Quelle que soit la valeur de résistance trouvée pour votre langue, notez-la dans votre carnet de notes. Je m'y référerai ultérieurement.

Éloignez maintenant les pointes de touche de votre langue, utilisez un mouchoir pour la sécher le plus possible, comme précédemment. Sans permettre à votre langue de se réhumidifier, recommencez le test précédent, la mesure devrait être supérieure.

Voici les deux conclusions du test de votre langue.

- Quand vous touchez les bornes d'une pile avec votre langue, plus celle-ci est humide, plus le courant qui circule semble être intense, provoquant un picotement plus important.
- En utilisant votre multimètre, plus votre langue est humide, plus il semble que sa résistance soit faible.

Figure 1-22. *Sélection de la résistance sur un multimètre à plage automatique.*

Figure 1-23. *Un multimètre manuel nécessite que vous choisissiez la plage de mesures.*

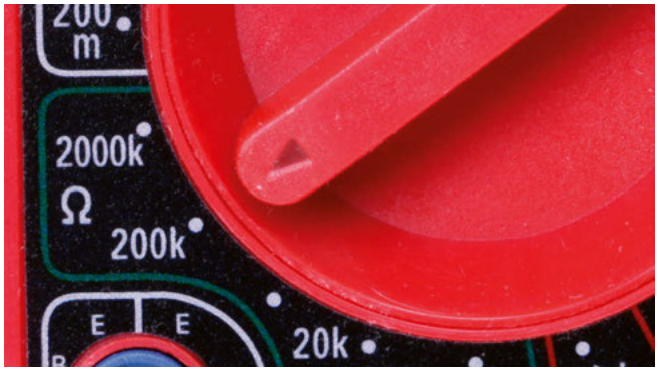


Figure 1-24. *Avec un multimètre manuel différent, le principe reste le même.*

J'ai utilisé le mot « semble » car nous n'avons encore rien prouvé. Tout ce dont nous disposons, c'est d'une théorie. Même si une faible résistance permet la circulation d'un courant plus important, j'aimerais savoir combien. D'ailleurs, qu'est-ce qu'un « courant » ?

Dans les prochaines expérimentations, vous pourrez découvrir les réponses à ces questions. À la fin de l'expérience 4, tous les mystères seront élucidés.

Que faire si vous n'obtenez aucune valeur de résistance pour votre langue et que vous ne voyez que le message d'erreur **OL ?** Essayez de nettoyer les pointes de touche, en commençant par un détergent tel que du produit à vaisselle, puis avec quelque chose de plus abrasif, comme du

dentifrice. N'utilisez pas de poudre à récurer, cela endommagerait le plaquage métallique des pointes. Rincez et séchez les sondes après ce nettoyage.

Si le test échoue à nouveau, ajoutez un peu d'eau salée sur votre langue comme suggéré lors du test avec une pile.

Autres résistances

Une expérience réussie devrait toujours fournir le même résultat si aucun facteur aléatoire n'interfère.

Le test de la langue est riche en facteurs aléatoires que l'on peut qualifier de ***variables incontrôlables***. L'humidité de votre langue est une variable. Je suspecte que l'écart entre les pointes de touche soit une autre variable, nous pouvons le vérifier.

Maintenez les pointes de touche afin que l'écart entre elles soit d'environ 5 mm. Touchez votre langue. Ensuite écartez les sondes de 25 mm et réessayez. Quelles valeurs obtenez-vous ?

> *Quand le courant électrique parcourt une distance plus courte, il rencontre une résistance plus faible si tous les autres facteurs demeurent identiques.*

Faites la même expérience sur votre bras, comme sur la figure 1-25. Si vous n'obtenez pas de valeur, humidifiez votre peau. Vous pouvez faire varier la distance entre les pointes de touche par valeurs fixes, par exemple 5 mm, et noter les valeurs indiquées par votre multimètre. Pensez-vous qu'en doublant la distance entre les pointes, la résistance mesurée soit doublée ?

Il existe une autre variable que je n'ai pas évoquée. Il s'agit de la pression exercée sur la peau par les sondes. Si vous appuyez plus fortement, je pense que la résistance va diminuer. Pouvez-vous le démontrer ? Pourquoi pensez-vous que cela se passe ainsi ? Pourriez-vous définir une expérience qui éliminerait cette variable ?

Si vous vous lassez de mesurer la résistance de votre peau, vous pouvez essayer de tremper les sondes dans un verre d'eau. Dissolvez ensuite un peu de sel dans l'eau et renouvelez le test. Vous avez sans doute entendu que l'eau conduisait le courant électrique, mais la réalité n'est pas aussi simple. L'eau pure à une résistance relativement élevée comme vous pourrez le constater en utilisant de l'eau distillée que vous trouverez dans les grandes surfaces. Du sel ou d'autres impuretés diminueront la résistance de l'eau.

Pour mieux comprendre ce qui se passe, vous devez mieux connaître ce qu'est le courant électrique que l'on nomme ***intensité.*** (Parfois on parle d'***ampérage***.) Je vais vous montrer comment cela se mesure dans l'expérience 2.

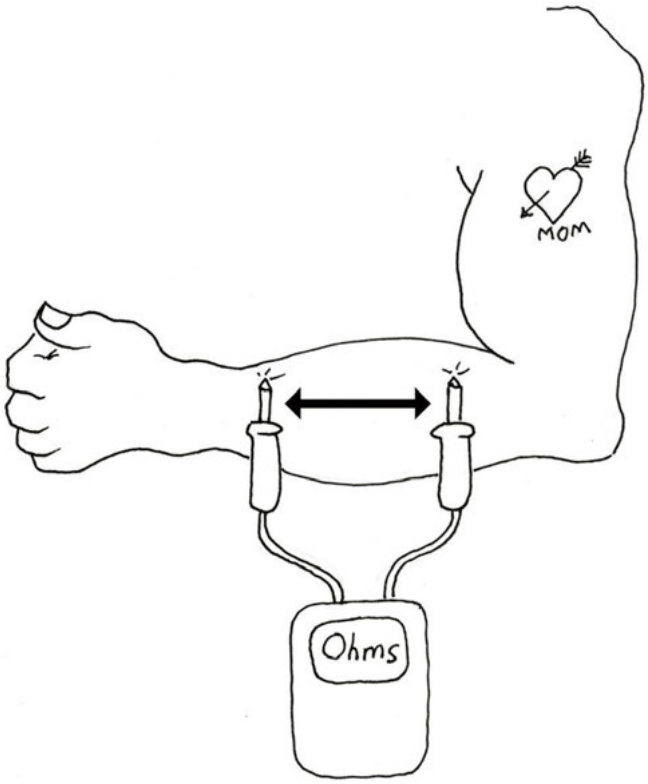


Figure 1-25. *Faites varier la distance entre les sondes et relevez les valeurs mesurées.*

Historique : l'homme qui a découvert la résistance

Georg Simon Ohm, qui apparaît sur la figure 1-26, est né en Bavière en 1787 et a travaillé dans l'ombre la majeure partie de sa vie. Il a étudié la nature de l'électricité à partir de fils

métalliques qu'il fabriquait lui-même. (Il était impossible de se faire livrer trente mètres de fil de sonnerie chez soi au début des années 1800.)

Malgré des moyens limités et de faibles connaissances en mathématiques, Ohm parvient à démontrer, en 1827, que la résistance d'un conducteur, tel que le cuivre, est inversement proportionnelle à l'aire de sa section et que le courant qui la traverse est proportionnel à la tension qui lui est appliquée, dans des conditions de température constante. Quatorze ans plus tard, la Royal Society of London reconnaît l'importance de ses travaux et le récompense de la Médaille Copley. Aujourd'hui, sa découverte est connue sous le nom de *loi d'Ohm*. Vous allez découvrir par vous-même la loi d'Ohm en effectuant l'expérience 4 (en fait, vous allez la redécouvrir).

Figure 1-26. *Georg Simon Ohm, après avoir été reconnu pour son travail de pionnier effectué en grande partie dans l'ombre.*

Nettoyage et recyclage

Votre pile ne devrait pas avoir été endommagée ou déchargée de façon importante par cette expérience. Vous pourrez l'utiliser à nouveau.

N'oubliez pas d'éteindre votre multimètre avant de le ranger ! La plupart des multimètres s'éteignent automatiquement après un laps de temps d'inutilisation ou vous préviennent par un bip sonore, cependant, vous économiserez d'autant plus leurs piles que vous les éteindrez rapidement.

Expérience 2
Découverte du courant électrique

Dans cette expérience, vous allez réaliser votre premier circuit qui vous permettra d'apprendre ce qu'est le courant électrique en amenant une LED à ses limites ; puis au-delà !

Vous aurez besoin de :

- 1 pile de 9 V
- 1 résistance de 15 ohms
- 1 résistance de 150 ohms
- 1 résistance de 470 ohms
- 1 résistance de 1,5K (1 500 ohms)
- 2 LED génériques
- 3 fils de tests (1 rouge, 1 noir, 1 d'une autre couleur)
- 1 multimètre

Évaluation d'une résistance

Pour des raisons que nous allons voir, il faut fréquemment ajouter une résistance à un circuit. Cela se fait très facilement en utilisant des composants connus nommés (devinez quoi ?) *résistances*, dont la valeur est exprimée en ohms.

Les résistances que vous achetez pour les projets de ce livre peuvent être ou ne pas être dans un enrobage identifié, cela n'a pas d'importance car vous pouvez connaître leurs valeurs autrement. Pour commencer, je vais vous montrer comment mesurer leurs valeurs, puis je vous expliquerai comment interpréter leur marquage.

Certaines résistances ont un minuscule marquage numérique imprimé sur leur corps, que vous pouvez lire à l'aide d'une loupe comme sur la figure 2-1. Malheureusement, la plupart des fabricants n'impriment pas la valeur de leurs résistances. Ils utilisent un code de couleurs.

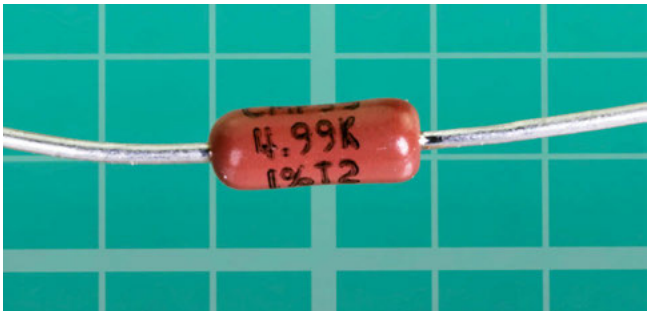


Figure 2-1. *Résistance peu répandue ayant sa valeur imprimée.*

La liste des composants que je fournis pour cette expérience mentionne les couleurs des anneaux imprimés sur chaque résistance. Vous pouvez les voir sur la figure 2-2. Les fils qui en sortent sont des *fils de connexion*, même s'ils ne ressemblent pas aux fils de connexion de votre multimètre ni aux fils de tests munis de pinces crocodiles à leurs extrémités. Les fils sortant de vos LED sont également des fils de connexion.

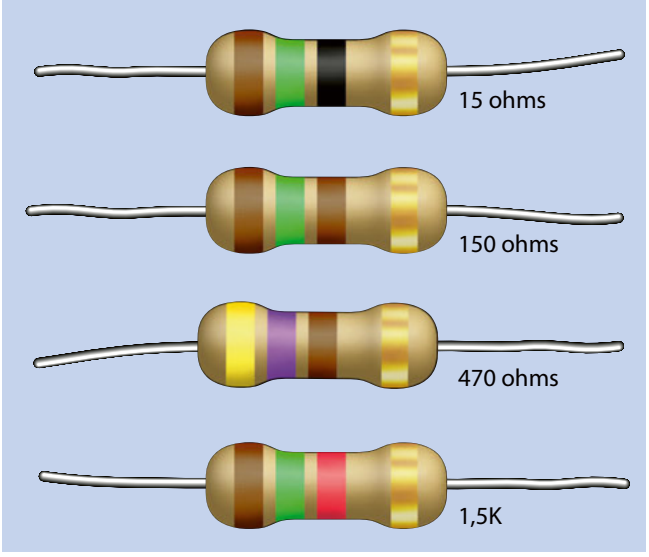


Figure 2-2. *Résistances nécessaires pour cette expérience.*

Il se peut que vos résistances aient un anneau de couleur ARGENT au lieu de l'anneau de couleur OR que je montre, cela n'a pas d'importance. Je vous expliquerai la différence par la suite.

Pour commencer, je veux que vous mesuriez les valeurs des résistances. Vérifiez que le câble de mesure rouge de votre multimètre est toujours inséré dans la borne commune volts-ohms de l'appareil, comme dans l'expérience 1. La résistance de 15 ohms a une valeur beaucoup plus petite que celle de votre langue, de ce fait, vous devez choisir un calibre différent. La plage de mesures de 200 ohms est souvent la plus petite qui soit disponible, essayons ce choix. La résistance peut être orientée indifféremment, cela n'a pas d'importance. Placez-là sur une surface isolante telle que du bois ou du plastique et saisissez les pointes de touche par leur corps en plastique. Si vous touchez la partie métallique des pointes de touche, vous mesurerez également la résistance de votre corps ce qui n'est pas ce que vous voulez faire, voir la figure 2-3.

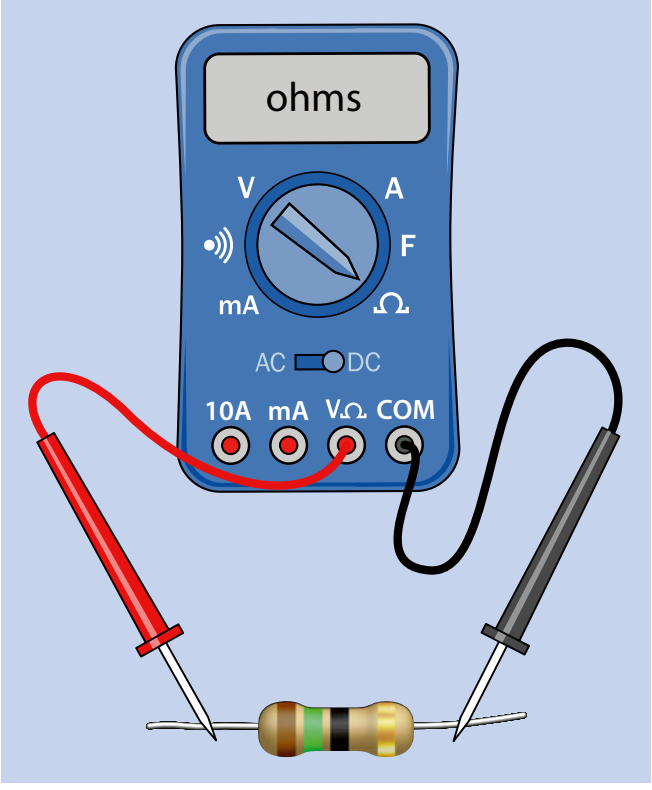


Figure 2-3. *Vérification de la valeur d'une résistance de 15 ohms.*

Appuyez fortement les pointes de touche sur les fils de la résistance afin de réaliser une bonne connexion. Si cela vous paraît difficile, vous pouvez essayer d'utiliser deux fils de test comme sur la figure 2-4. Vous pourrez ainsi réaliser une mesure de résistance en gardant vos mains libres et les résultats seront similaires.

Notez la valeur de la résistance mesurée sur votre carnet de notes. Retirez la résistance de 15 ohms et remplacez-la par celle de 150 ohms. Après l'avoir mesurée, essayez la mesure de la résistance de 470 ohms, vous devriez obtenir l'affichage du message d'erreur OL jusqu'à ce que vous changiez le calibre de votre multimètre de 200 ohms à 2K. Terminez en vérifiant la résistance de 1,5K.

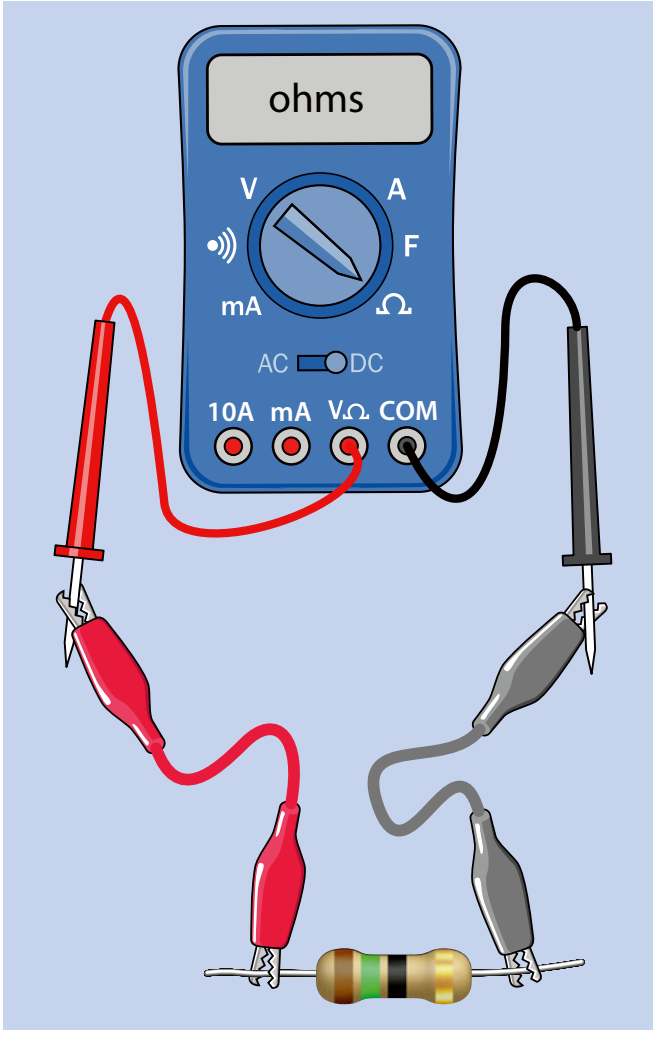


Figure 2-4. *Utilisation de deux fils de tests pour agripper la résistance.*

Je parie que les valeurs que vous mesurez ne sont pas exactement celles que vous attendiez. Les valeurs que j'ai trouvées en faisant ces mesures étaient `15,1 ohms`, `148 ohms`, `467 ohms` et `1520 ohms`.

Vous venez de découvrir une réalité de base de l'électronique :

> *Les mesures ne sont jamais précises.*

Votre multimètre n'est pas très précis, pas plus que les valeurs des résistances. D'autres facteurs peuvent interférer, comme par exemple la température de la pièce, qui affectent la valeur de la résistance. Il existe également une très faible résistance entre les cordons de mesure du multimètre et les fils de la résistance. Votre but est d'obtenir une mesure la plus précise possible, mais une précision absolue est impossible. C'est ainsi que cela se passe quand vous travaillez sur des circuits électroniques.

Décodage de la valeur d'une résistance

Maintenant que vous avez vérifié les valeurs de vos résistances, je vais vous expliquer leur codage. Le système est illustré sur la figure 2-5, et le processus est le suivant.

- Ignorez la couleur du corps de la résistance.
- S'il y a un anneau ARGENT ou OR, orientez la résistance de façon à ce que cet anneau soit à droite de la résistance. ARGENT signifie que la valeur de la résistance est précise à plus ou moins 10 %, OR signifie une précision de plus ou moins 5 %. Ce pourcentage est appelé *tolérance* de la résistance. Certaines résistances ont une tolérance de 1 % ou même moins, en ce cas elles n'auront pas d'anneau ARGENT ou OR, d'autres couleurs seront alors utilisées. Quoi qu'il en soit, il y aura un espace plus important entre cet anneau et les autres.
- À l'extrémité gauche de la résistance, il y aura un groupe de trois ou quatre anneaux de couleur. Les deux premiers indiquent les deux premiers chiffres de la valeur de la résistance. S'il y a quatre anneaux, les couleurs des trois premiers anneaux indiquent les trois premiers chiffres de la valeur.
- Le dernier anneau du groupe indique le nombre de zéros suivant les premiers chiffres de la valeur.

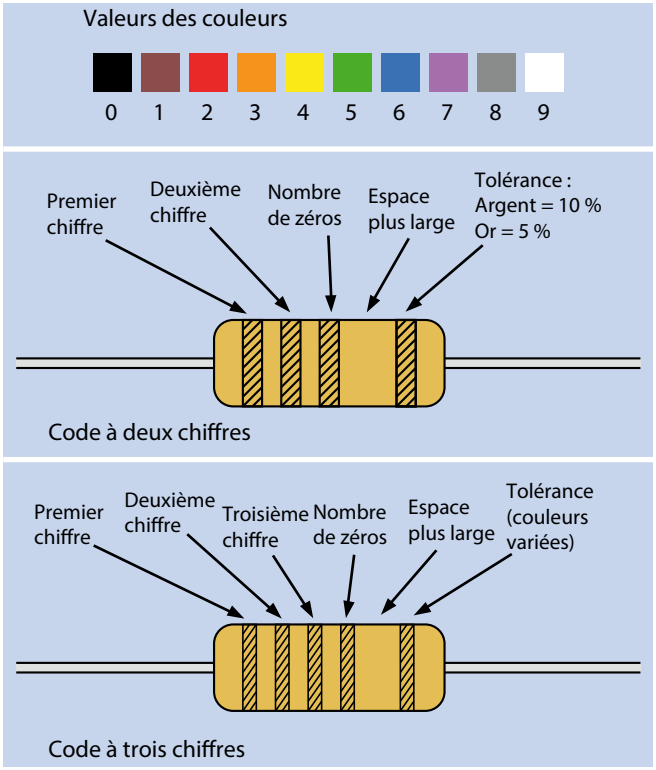


Figure 2-5. *Code de couleur des résistances.*

Par exemple, observez votre résistance de 1,5K. Ses couleurs sont marron (1), vert (5) et rouge (deux zéros). En d'autres termes 1 500 soit, 1,5K.

Une résistance avec un groupe de quatre anneaux de couleur possédera en général une tolérance meilleure que 5 %. La tolérance exacte n'est pas importante pour les projets de ce livre.

Nombres mystérieux

Si vous observez quelques résistances ou les achetez en ligne, vous noterez que les mêmes paires de chiffres significatifs sont utilisées en séquence. En centaines d'ohms, on trouve souvent 100, 150, 220, 330, 470 et 680. En milliers d'ohms, la suite typique est 1,0K, 1,5K, 2,2K, 3,3K, 4,7K et 6,8K. En dizaines d'ohms, on trouve 10, 15, 22, 33, 47 et 68. Pourquoi ?

Il y a longtemps, fabriquer des résistances ayant une valeur précise était un réel challenge, la tolérance était

couramment de 20 %. En d'autres termes, la valeur réelle d'une résistance pouvait être supérieure ou inférieure de 20 % par rapport à sa valeur supposée. Dans le cas d'une résistance de 15K, sa valeur pouvait être de 12K car :

```
15K – 20% = 12K
```

D'autre part, une résistance de 10K pouvait atteindre une valeur de 20 % supérieure, soit 12K, car :

```
10K + 20% = 12K
```

Ainsi, une résistance de 10K et une résistance de 15K, pouvaient avoir la même valeur, il n'y avait donc pas de raison de fabriquer des résistances de valeurs intermédiaires.

La figure 2-6 le montre. Les chiffres en blanc sont les *valeurs nominales* de fabrication, c'est-à-dire les valeurs que les fabricants tentent d'obtenir. Vous pouvez constater qu'elles ont été astucieusement choisies afin que leurs valeurs se chevauchent.

Les résistances sont maintenant fabriquées de façon beaucoup plus précise, mais les électroniciens ont conservé l'habitude d'utiliser les anciennes plages de valeurs et ce sont celles que vous trouverez le plus fréquemment. Partant de ce principe, ce sont celles que j'ai utilisé dans ce livre.

Valeur nominale moins 20 %	0,8	1,2	1,76	2,64	3,76	5,44
Valeur nominale	**1,0**	**1,5**	**2,2**	**3,3**	**4,7**	**6,8**
Valeur nominale plus 20 %	1,2	1,8	2,64	3,96	5,64	8,16

Figure 2-6. *Valeurs originales des résistances et leurs valeurs plus ou moins 20 %.*

Votre premier circuit

Observez l'une de vos LED rouges. Les anciennes lampes dépensaient beaucoup d'énergie en convertissant l'électricité en chaleur, les LED sont beaucoup plus intelligentes : elles convertissent pratiquement toute leur puissance absorbée en lumière, de plus elles durent presque indéfiniment – à condition de ne pas les maltraiter.

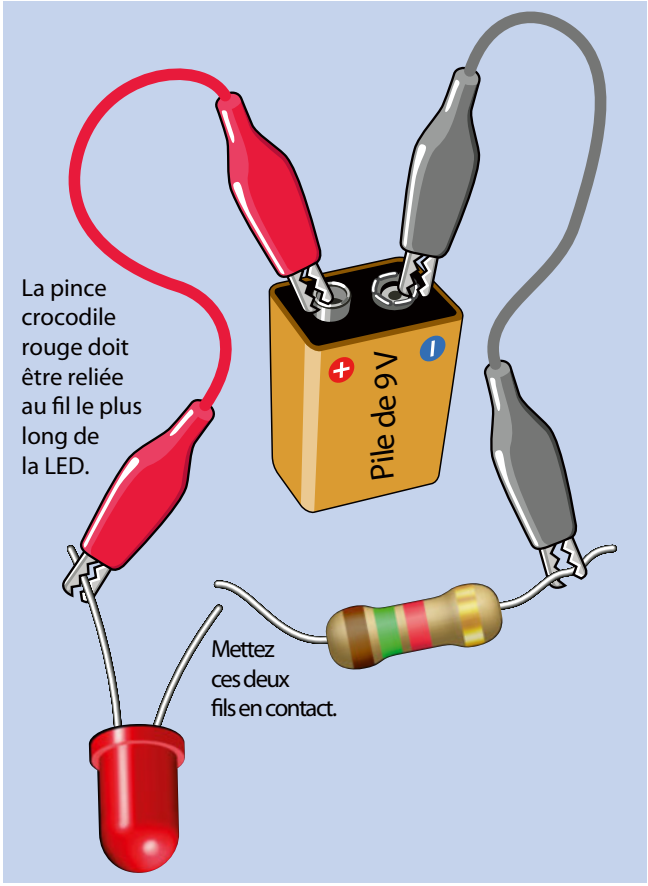


Figure 2-7. *Test d'une LED*

Que se passe-t-il si vous les utilisez de façon inappropriée ? Il est temps de le découvrir.

Commencez avec votre résistance de 1,5K. C'est celle avec les anneaux marron, vert et rouge. Reliez-la au fil de test connecté au pôle négatif de votre pile de 9 V. La résistance peut être reliée dans n'importe quel sens, cela importe peu. Utilisez maintenant un autre fil de test et reliez-le à votre LED comme sur la figure 2-7. Vous *devez* faire attention à relier votre LED correctement comme illustré.

> *Quand vous reliez une LED à un circuit électrique, son fil le plus long doit toujours être plus positif que son fil le plus court, comme si le fil le plus long avait une longueur en plus.*

Mettez en contact le fil libre de la LED avec celui de la résistance. Votre LED s'allume ! Surprenant. Vous venez de réaliser votre premier circuit.

Fondamentaux : la polarité

Lorsque vous utilisez une source d'électricité telle qu'une pile, rappelez-vous que :

- Le symbole « plus » signifie « pôle positif ».
- Le symbole « moins » signifie « pôle négatif ».
- La distinction entre pôle positif et pôle négatif est la *polarité*.

Lorsque la documentation d'un fabricant ou un livre vous indique qu'un composant tel qu'une LED à une polarité, assurez-vous de le connecter correctement.

Si vous appliquez une tension positive sur le fil le plus court d'une LED au lieu du fil le plus long, vous appliquez une *polarité inverse* et la LED n'éclairera pas. Cela pourrait également diminuer sa durée de vie.

Que se passerait-il si vous coupiez les fils d'une LED afin de l'adapter au circuit que vous réalisez et que vous ne vous rappeliez plus lequel était le plus long ? Pas de problème, le type de LED que vous utilisez possède sur sa base circulaire, un méplat identifiant le fil le *plus court* (le plus négatif).

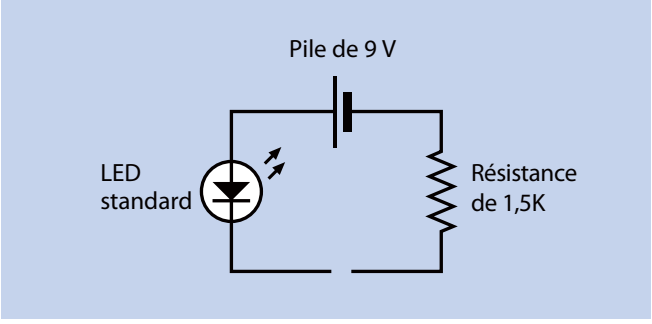


Figure 2-8. *Schéma du circuit de test de la LED.*

Schéma

Observez la figure 2-8 et notez la similarité avec la figure 2-7. Le circuit est le même, mais je l'ai redessiné en utilisant des symboles. Il s'agit d'un schéma. Je vais utiliser des schémas tout au long du livre car ils sont faciles à comprendre et n'utilisent pas une grande surface. Vous ferez connaissance avec davantage de symboles en réalisant l'expérience 6.

Notez les deux polarités indiquées sur la figure 2-8 :

- Le trait long du symbole de la pile indique le pôle positif.
- Le grand triangle à l'intérieur du symbole de la LED indique toujours le pôle positif pointant vers le pôle négatif.
- Les petites flèches sont juste présentes pour vous rappeler qu'il s'agit d'une diode luminescente (*Light Emitting Diode*, LED). Les autres types de diodes n'émettent pas de lumière.

En Europe, le symbole d'une résistance est un simple rectangle avec sa valeur imprimée à l'intérieur. J'utilise le symbole américain en zigzag, certaines personnes en Europe en font de même.

Surcharge d'une LED

Déconnectez maintenant la résistance de 1,5K et remplacez-la par une résistance de 150 ohms : marron-vert-marron. Que se passe-t-il ?

La LED est beaucoup plus lumineuse.

En humidifiant votre langue, vous aviez réduit la résistance entre les sondes de votre multimètre, provoquant ainsi un picotement plus intense en appliquant la pile de 9 volts. En réduisant la résistance dans votre circuit, vous excitez davantage la LED.

Pensez-vous pouvoir la rendre encore plus lumineuse ? Vous pouvez peut-être imaginer ce qui va se produire ; mais imaginer n'est pas suffisant. Retirez la résistance de 150 ohms et remplacez-la par une résistance de 15 ohms, mais ne mettez pas encore les fils libres en contact. À cet instant, quiconque ayant des connaissances en électronique vous dirait « Non, non, ne faites pas cela ! » Mais quand quelqu'un me dit de ne pas faire quelque chose, j'ai toujours envie de voir ce qui va se passer si je le fais !

Une précaution cependant ; les fils pourraient devenir très chauds si vous les laissez en contact trop longtemps. Pour plus de précautions, utilisez des gants.

Quand le fil de la LED entre en contact avec le fil de la résistance de 15 ohms, pendant un court instant, la LED devient extrêmement brillante. Mais non… c'était trop beau pour durer. La LED s'éteint jusqu'à ce qu'il ne reste qu'un soupçon de luminosité. Certaines LED sont plus sérieusement détruites que d'autres. Je ne suis pas sûr de la raison. Quelques lecteurs m'ont dit que leurs LED se séparaient en deux quand elles subissaient une surcharge. Bien que j'aie essayé, je n'ai pas réussi à le reproduire. Je sais, par contre, que les LED de 3 mm se détruisent plus rapidement que les LED de 5 mm.

Quoi qu'il en soit, vous savez maintenant combien il est facile de détruire des composants électroniques. Jetez la LED que vous avez surchargée car elle ne fonctionnera plus jamais. Sa vie a été sacrifiée dans le but de vous montrer une expérience formatrice. Bien que les LED soient une merveilleuse invention électronique, elles ne sont pas très coûteuses.

Pourquoi la LED a grillé est une question importante ? Vous pourriez imaginer qu'un courant électrique trop important l'a traversée, mais à nouveau, je n'aime pas imaginer. Je pense que vous avez besoin de mesurer ce courant, votre multimètre va vous le permettre. Pour commencer, je vais vous donner une définition.

Définissons le courant

Un courant électrique est le flux d'électricité par seconde, habituellement mesuré en *ampères*, d'abréviation *A*. Le flux est constitué d'*électrons*, chacun étant une particule minuscule portant une charge électrique. Si la perception humaine était assez rapide pour compter les électrons traversant un conducteur, vous pourriez évaluer qu'un ampère correspond au passage de 6,25 quintillions d'électrons par seconde.

Fondamentaux : l'ampère

L'ampère est une unité internationale dont l'abréviation est la lettre A. Un milliampère (habituellement écrit mA) est 1/1 000e d'ampère. Un microampère (habituellement écrit µA) est 1/1 000e de milliampère.

```
1 mA = 1000 µA

1 A = 1000 mA = 1000000 µA
```

Un tableau de valeurs intermédiaires est indiqué figure 2-9.

Microampères	Milliampères	Ampères
1 µA	0,001 mA	0,000001 A
10 µA	0,01 mA	0,00001 A
100 µA	0,1 mA	0,0001 A
1 000 µA	1 mA	0,001 A
10 000 µA	10 mA	0,01 A
100 000 µA	100 mA	0,1 A
1 000 000 µA	1 000 mA	1 A

Figure 2-9. *Conversion des unités de courant électrique.*

Mesure de l'intensité d'un courant électrique

Tous les multimètres que j'ai vus possèdent une borne prévue pour la mesure des intensités identifiée par **10A** ou **20A**, indiquant le nombre maximum d'ampères que vous pouvez mesurer. Pour l'instant, vous n'aurez pas à mesurerez un courant très élevé. Votre multimètre possèdera également une borne identifiée par **mA**, signifiant milliampères, permettant la mesure d'intensités plus faibles. La valeur maximum admissible pour cette borne est en général indiquée à côté. C'est souvent 200 mA, parfois 400 mA. Observez votre multimètre avec attention et mémorisez combien de mA il peut mesurer.

La borne **mA** est souvent séparée des autres, mais pas systématiquement ! Certains multimètres combinent la mesure des tensions, résistances et intensités en mA sur une seule borne. La figure 2-10 montre un tel multimètre. Cet appareil est inhabituel car sa borne **COM** est située au milieu, mais son fonctionnement est le même, et la borne située à droite est clairement identifiée volts, ohms et milliampères.

Figure 2-10. *Ce multimètre permet la mesure des tensions, résistances et intensités sur la même borne.*

C'est une option agréable car vous pouvez, pratiquement tout le temps, laisser le fil rouge connecté à la même borne. Cependant, comme la plupart, votre multimètre peut avoir une borne séparée pour la mesure des intensités en mA. Dans l'expérience précédente, les multimètres des figures 1-19 et 1-20 sont ainsi conçus.

Pour pouvoir mesurer un courant électrique, celui-ci doit passer au travers de votre multimètre. Cela exige certaines précautions, car un courant trop important pourrait griller un fusible à l'intérieur de votre appareil. Dans ce cas, vous devrez l'ouvrir pour remplacer le fusible par un modèle strictement équivalent, et pendant que vous l'attendez, si vous le commandez en ligne, vous ne pouvez plus effectuer aucune mesure avec votre appareil. Dans les multimètres bas de gamme, le fusible n'est peut-être pas monté sur un support ce qui rend son remplacement difficile et très problématique.

Évitez donc de soumettre votre multimètre à une intensité trop importante. En prenant de simples précautions, cela ne devrait jamais arriver. Personnellement, plus de cinq ans se sont écoulés depuis que j'ai grillé le fusible de mon multimètre, et à cette occasion, je me suis procuré une paire de fusibles de rechange, au cas où cela se reproduirait.

Pour le circuit que vous manipulez dans cette expérience, vous pouvez sans crainte utiliser la borne **mA** de n'importe quel multimètre, car je sais que vous ne devrez pas mesurer une intensité supérieure à 25 mA. Choisissez la plage la plus élevée, en général 200 mA.

Comment faire si je ne vous avais pas dit quelle valeur de courant vous devriez mesurer ? Vous devriez alors effectuer un calcul que j'expliquerai au chapitre 4, ou commencer en utilisant la borne **10 A** (ou **20 A**), puis continuer votre travail.

Intensité dans le circuit à LED

Je souhaite maintenant que vous recommenciez votre circuit avec une nouvelle LED. Cette fois, assurez-vous d'utiliser la résistance de 1,5K, pas celle de 150 ohms, encore moins celle de 15 ohms. Vous ne devez plus maltraiter davantage de LED sans raison.

Insérez le multimètre dans le circuit comme sur la figure 2-11, en vérifiant que le fil rouge du cordon de mesure est inséré dans la borne **mA** et non dans la borne volts-ohms (en supposant que votre multimètre possède une borne séparée pour la mesure des mA).

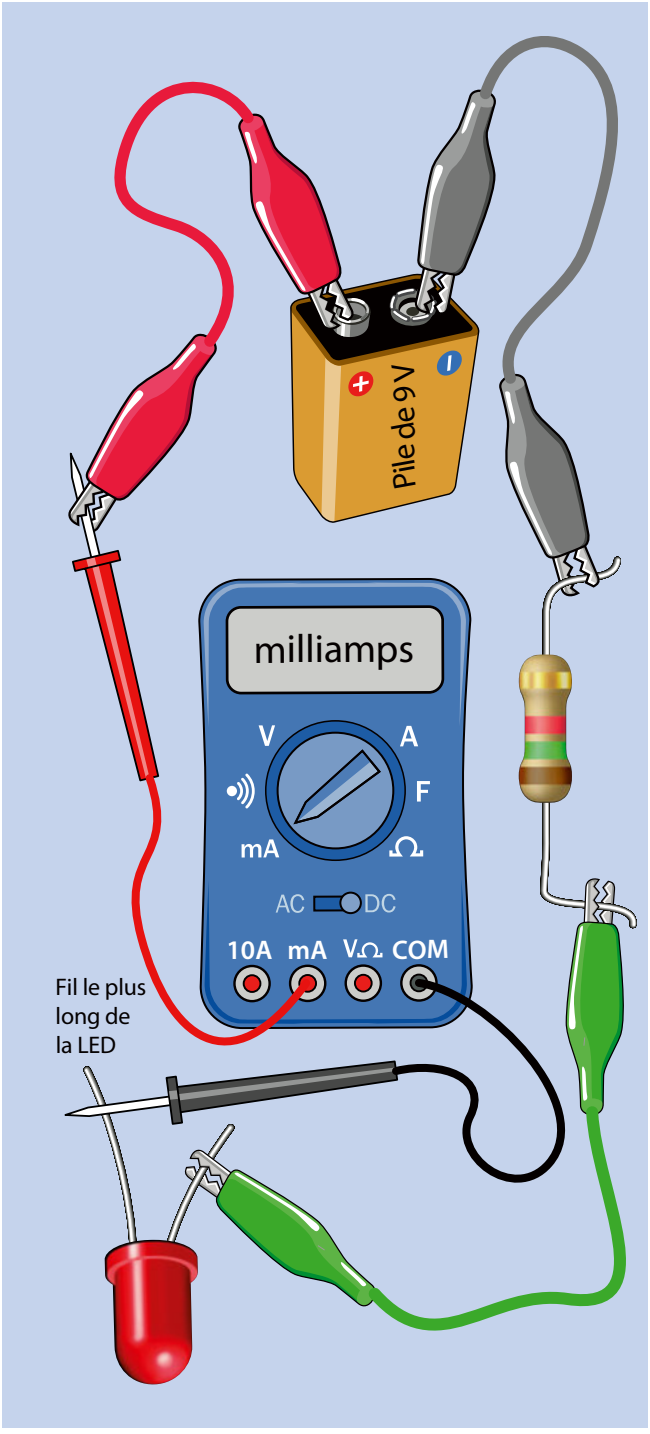


Figure 2-11. *Mesure d'une intensité avec votre multimètre.*

Rappelez-vous, quand vous mesurez une intensité, le multimètre est inséré dans le circuit, le courant le traverse.

Depuis le pôle positif de la pile, le courant circule au travers du multimètre, de la LED, de la résistance, et revient au pôle négatif de la pile.

Vous pourriez vous inquiéter que le cordon noir du multimètre soit relié au fil le plus long de la LED, mais ceci est normal. Voici l'explication :

- Le fil rouge du multimètre doit être plus positif que le fil noir, il est relié au pôle positif de la pile.
- Le fil noir du multimètre est relié au pôle négatif de la pile au travers de la LED et de la résistance.

Quelle valeur est affichée par votre multimètre ? Quelle que soit la valeur, notez-la. J'ai obtenu 5,1 mA dans mon circuit. En fait c'était 5,08, mais je l'ai arrondi à 5,1 car ce type de mesure n'est pas très précis, pour des raisons que je vais expliquer rapidement. Inclure des décimales que la mesure ne garantit pas n'est pas une bonne pratique.

- Quand vous supprimez une décimale, si c'est 5, 6, 7, 8 ou 9, ajoutez 1 au chiffre précédent. Ainsi, 5,08 devient 5,1. C'est l'action *d'arrondir par excès*.
- Si vous retirez le chiffre 1, 2, 3 ou 4, vous ne devez pas modifier le chiffre précédent. C'est *arrondir par défaut.*

Déconnectez votre multimètre de la partie gauche de votre circuit et insérez-le dans la partie droite. Les deux positions souhaitées du multimètre sont indiquées sur la figure 2-12. Assurez-vous que le cordon noir du multimètre est relié au pôle négatif de la pile. Quand j'ai fait cela, le multimètre indiquait exactement la même valeur que précédemment. Est-ce que vous constatez la même chose avec votre circuit ? J'espère que oui, car dans un circuit aussi simple que celui-ci, le courant n'a aucun autre endroit où il pourrait s'écouler. En fait, il doit être identique partout.

L'intensité du courant est la même en tout point d'un circuit simple.

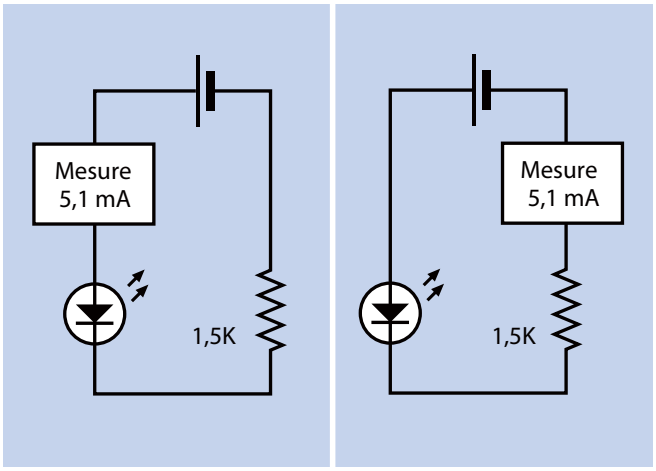


Figure 2-12. *Deux façons de mesurer une intensité dans un circuit.*

Est-ce que 5,1 mA est une intensité correcte pour la LED ? Il semble bien en effet. La LED ne grille pas. Serait-ce toujours le cas si vous la laissiez être parcourue par un courant de 5,1 mA durant une journée ou deux ? Hum – je crois que oui.

Sinon, pensez-vous que vous pourriez obtenir un peu plus de luminosité de votre LED sans l'endommager, en réduisant légèrement la valeur de la résistance ? Il y a un moyen simple de lever le doute. Interrogez le fabricant.

Obtention des données

Pratiquement tous les composants ont une fiche technique (datasheet) publiée en ligne par le fabricant. La trouver est facile si vous connaissez la référence du composant. Quand vous achetez un composant, vous connaissez sa référence. Si vous utilisez un composant faisant partie d'un kit, le fournisseur indique en général les références des composants de l'ensemble.

Supposons que ma LED soit le composant Cree C503B-RAN. J'utilise mon moteur de recherche habituel et j'entre la paraphrase de recherche : « Cree C503B-RAN ».

Peu de temps plus tard, toutes les informations que je peux souhaiter obtenir sont affichées. Il y a en fait beaucoup plus que je n'en ai besoin, j'ai extrait les informations de la fiche technique qui m'intéressent et les ai mises sur la figure 2-13.

Quand vous consultez une fiche technique et voyez la mention « Absolute Maximum Ratings » (valeurs maximales absolues), considérez-la comme le panneau routier indiquant la hauteur maximale sous un pont. Les valeurs indiquées sont primordiales ! Elles signifient que si vous dépassez ces limites, le composant sera endommagé. Restez toujours *largement en dessous* des valeurs maximales.

Pour cette LED, vous pouvez voir que 50 mA est le courant maximum admissible, donc ma valeur de 5,1 mA est une fraction de l'*intensité directe* (*forward current,* courant dans le sens correct) qui peut circuler dans cette LED.

Considérez *peak forward current* comme l'intensité maximale qui peut circuler pendant une fraction de seconde dans le composant, si par exemple votre source d'alimentation fluctuait pour une raison ou une autre. Cela ne devrait normalement jamais se produire.

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS (T_A = 25°C)

Items	Symbol	Absolute Maximum Rating	Unit
Forward Current	I_F	50 Note1	mA
Peak Forward Current Note2	I_{FP}	200	mA
Reverse Voltage	V_R	5	V
Power Dissipation	P_D	130	mW
Operation Temperature	T		

TYPICAL CHARACTERISTICS (T_A = 25°C)

Characteristics	Condition	Minimum	Typical	Maximum
Forward Voltage	I_F = 20 mA		2.1	2.6
Reverse Current	V_R = 5 V			100
Dominant Wavelength	I_F = 20 mA			

Figure 2-13. *Sections extraites de la fiche technique d'une LED.*

Regardez maintenant les « *Caractéristiques typiques* » (*Typical Characteristics*) de la fiche technique. Le terme « Typical » est souvent abrégé « Typ ». Ce sont les valeurs réalistes que vous devez utiliser de façon courante. Notez que dans la colonne Condition, il est inscrit « I_F = 20 mA ». Je vous expliquerai le terme étrange « I_F » par la suite, quand je reparlerai davantage des fiches techniques, mais pour l'instant, 20 mA est ce que vous devez connaître. C'est la valeur que vous devez respecter dans une utilisation « typique » de la LED.

Ainsi, utiliser une résistance de 1,5K était un choix très sûr. Vous pourriez la remplacer par une résistance de valeur inférieure et mesurer l'intensité jusqu'à aboutir à une valeur proche de 20 mA, mais je vais vous donner la réponse : 470 ohms est une option raisonnable avec une pile de 9 V, pour une LED générique.

Vous pouvez le vérifier vous-même.

Bien entendu, si vous préférez que votre LED soit moins lumineuse, par exemple pour augmenter la longévité de la pile, rien ne vous empêche de choisir une résistance de valeur plus élevée.

Vous avez maintenant un circuit qui va utiliser votre LED de façon sûre pour une très longue durée. La leçon à retenir est : « Toujours se référer aux fiches techniques des fabricants ! » Conservez la résistance de 470 ohms dans votre circuit mais retirez la pince crocodile de la pile afin de ne pas la vider.

Historique : le père de l'électromagnétisme

Né en France en 1775, André-Marie Ampère (figure 2-14) était un mathématicien prodige qui devint professeur de sciences, alors qu'il s'était principalement éduqué par lui-même dans la librairie de son père. Son travail le plus connu consista à établir en 1820, une théorie de l'électromagnétisme, décrivant la façon dont un courant électrique pouvait générer un champ magnétique.

Figure 2-14. *André-Marie Ampère a découvert qu'un courant électrique parcourant un fil crée autour de lui un champ magnétique. Il a utilisé ce principe pour réaliser le premier appareil de mesure de ce qui fut ensuite appelé un ampérage.*

Il a également construit le premier instrument capable de mesurer un flux électrique (appelé *galvanomètre*) et a découvert la fluorine.

À cette époque, les gens n'étaient pas distraits par les messages écrits ou les vidéos de toutes sortes.

Fondamentaux : courant continu et courant alternatif

Le courant généré par une pile est appelé *courant continu* (*CC* en abrégé, ou *DC* pour *Direct Current*, en anglais). Comme l'eau qui s'écoule d'un robinet, c'est un flux continu et unidirectionnel.

Le courant disponible sur une prise de courant domestique est du *courant alternatif*, (*CA* en abrégé, ou *AC* pour *Alternating Current* en anglais). La *phase* (appelée *live* en anglais) d'une prise de courant change de positif à négatif 60 fois par seconde (50 en Europe et dans de très nombreux autres pays), par rapport au *neutre* (*neutral* en anglais).

Le courant alternatif est utile car votre compagnie d'électricité utilise des transformateurs pour réduire la haute tension des lignes de transport à une valeur moins dangereuse dans votre habitation, et pour des raisons que j'expliquerai plus tard, un transformateur ne fonctionne qu'avec du courant alternatif.

Le courant alternatif est également utile pour le fonctionnement des moteurs et des appareils domestiques.

La figure 2-15 représente une prise de courant utilisée en France. La borne A est la borne de « *phase* » qui délivre la tension alternative de façon positive et négative par rapport à la borne B qui est le « *neutre* ». Si un appareil présente un défaut, par exemple un fil volant qui toucherait l'intérieur de son boîtier métallique, il doit vous protéger en provoquant l'écoulement de la tension par la borne C de la prise, qui est reliée à la « *terre* ».

En France, la prise de courant de cette illustration est utilisée pour des tensions de 220 volts. D'autres types de prises existent pour des tensions plus élevées ; elles comportent toujours une borne de phase, une pour le neutre et une pour la liaison à la terre, à l'exception des prises prévues pour les appareils triphasés, principalement utilisés dans l'industrie.

D'autres types de prises existent dans les autres pays, mais le principe reste identique.

Dans ce livre, je parlerai principalement du courant continu, d'une part car les appareils électroniques simples sont alimentés par une tension continue et, d'autre part, parce que son comportement est plus facile à comprendre.

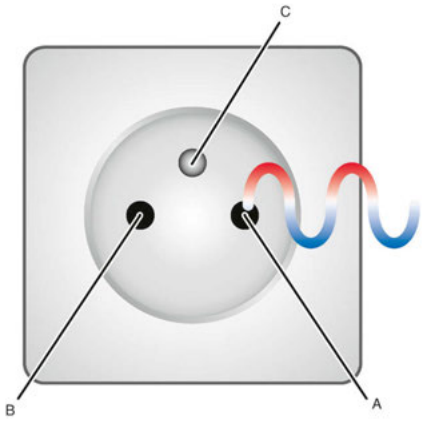


Figure 2-15. *Les bornes d'une prise de courant.*

Nettoyage et recyclage

Vous allez continuer à utiliser le même circuit dans l'expérience suivante, il n'y a donc rien à mettre au rebut et la pile devrait toujours fonctionner.

Expérience 3

Appliquons une pression

Dans cette expérience, vous allez apprendre ce qu'est une tension électrique.

Vous aurez besoin de :

- 1 pile de 9 V
- 1 résistance de 470 ohms, jaune-violet-marron
- 2 résistances de 1K, marron-noir-rouge
- 1 résistance de 1,5K, marron-vert-rouge
- 1 résistance de 2,2K, rouge-rouge-rouge
- 1 résistance de 3,3K, orange-orange-rouge
- 1 LED générique
- 3 fils de test (1 rouge, 1 noir, 1 d'une autre couleur)
- 1 multimètre

Fondamentaux : différence de potentiel

Votre multimètre va maintenant mesurer des tensions en volts, il ne doit plus être inséré dans votre circuit. Votre circuit doit ressembler à celui de la figure 3-1, et son schéma est représenté sur la figure 3-2.

Vous allez mesurer des tensions, vous devez retirer le cordon rouge de la borne **mA** de votre multimètre et l'insérer dans la borne **volt-ohm**.

Si votre multimètre possède une borne séparée pour la mesure des milliampères mA, vérifiez toujours que le cordon rouge est inséré dans la borne volts-ohms avant de mesurer des tensions en volts. Toujours !

Positionnez votre bouton de sélection pour mesurer une tension continue de 20 volts (20VCC), ou juste sur volts CC, si votre multimètre est à calibre automatique. Voir les figures 3-3 et 3-4.

Vous pouvez maintenant utiliser votre multimètre pour vérifier les tensions entre n'importe quels points de votre circuit.

Un multimètre a une résistance très élevée lorsqu'il mesure des tensions en volts, un très faible courant le parcourt. Ainsi, vous pouvez mesurer la tension entre les bornes de votre pile, comme sur la figure 3-5, le multimètre ne sera pas endommagé. Notez la valeur trouvée.

Lorsque vous mesurez une tension, le multimètre ne doit pas être inséré dans le circuit. Il se tient à l'extérieur du circuit, comme l'observateur d'une épreuve sportive chargé de l'enregistrement du score.

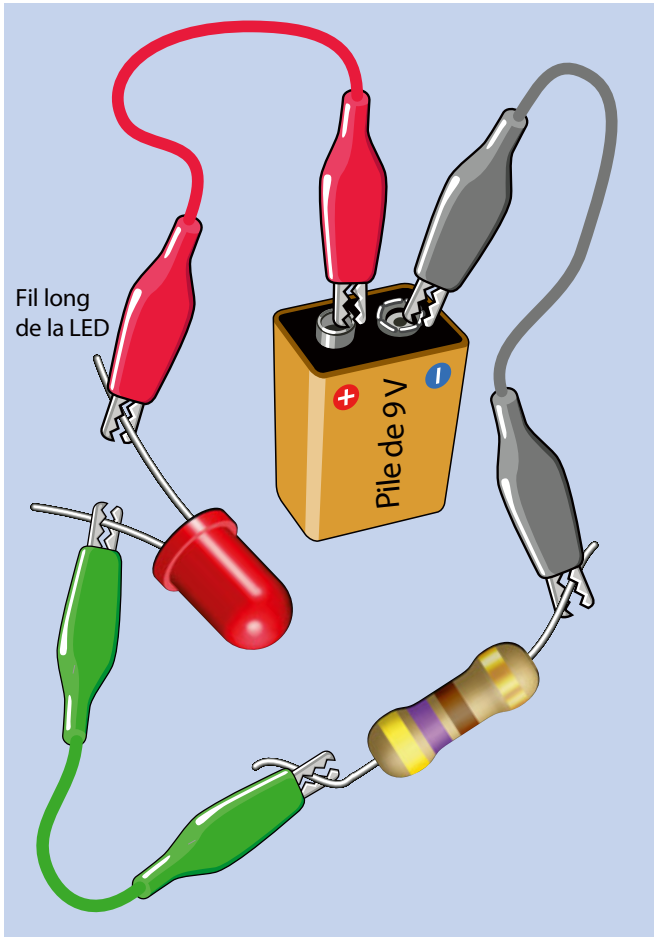


Figure 3-1. *Commencez par ce circuit.*

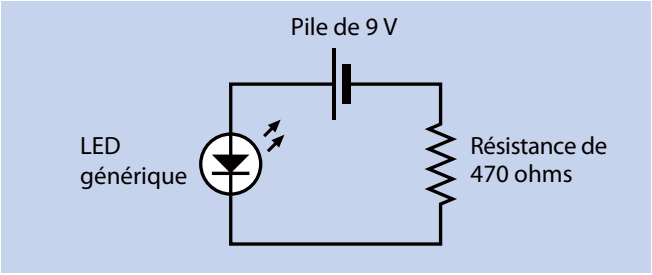


Figure 3-2. *Schéma du circuit de la figure 3-1.*

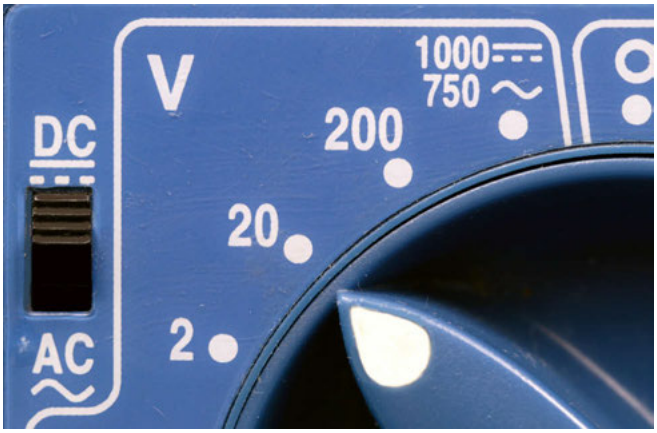


Figure 3-3. *Sélection de la plage adéquate pour la mesure des tensions sur un multimètre à calibre manuel.*

Figure 3-4. *Réglage d'un multimètre à calibre automatique pour la mesure des tensions.*

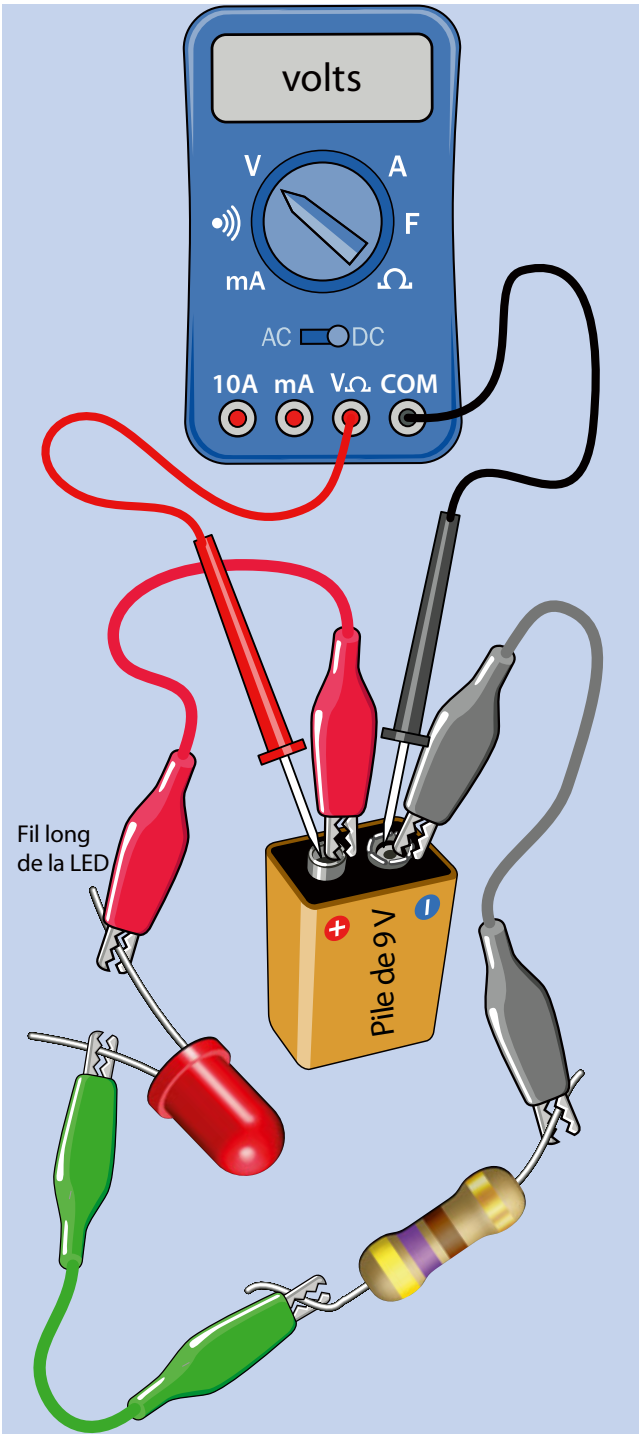


Figure 3-5. *Vérification de la tension de votre pile dans le circuit.*

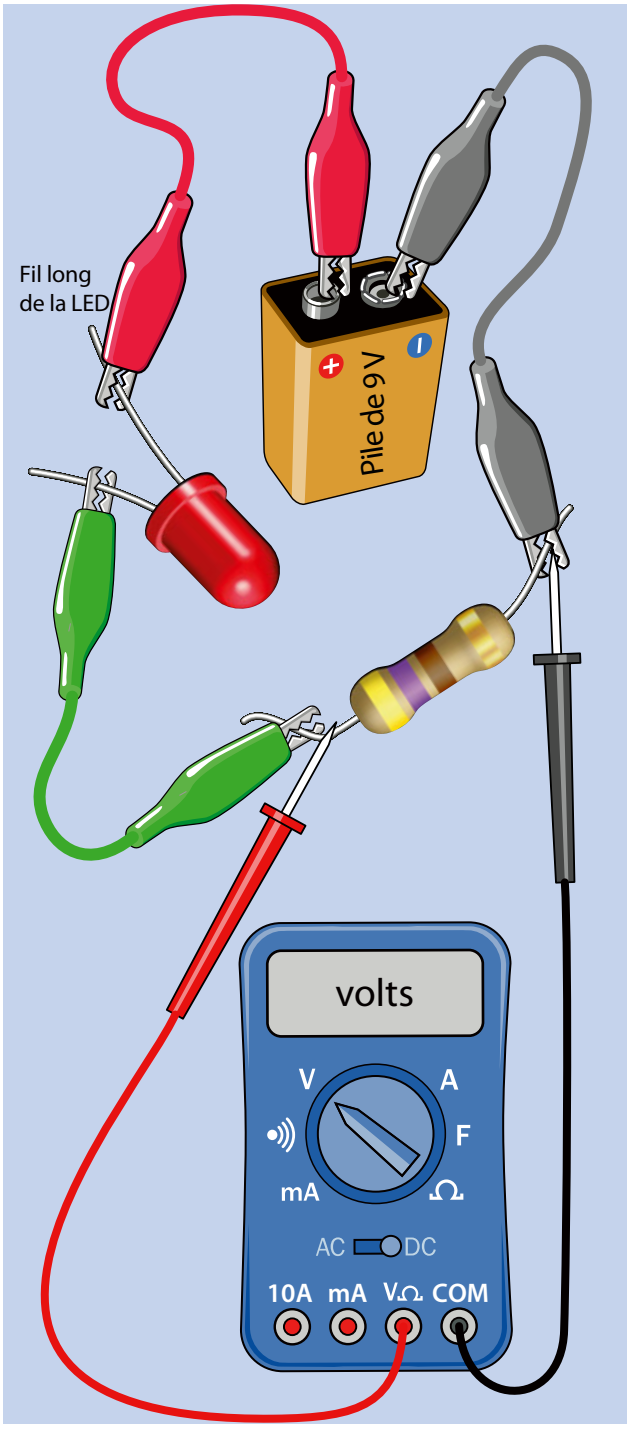


Figure 3-6. *Mesure de la chute de tension aux bornes de la résistance.*

Si vous reliez les pointes de touche aux bornes de la résistance, comme sur la figure 3-6, vous allez évaluer la chute de tension provoquée par la résistance dans le circuit. Notez-la.

Vous pouvez en faire de même avec la LED.

Le schéma de la figure 3-7 indique les valeurs que j'ai obtenues durant cet essai, je les ai arrondies à une décimale près.

Vos valeurs ne seront pas exactement identiques aux miennes, car mon multimètre, ma résistance et ma pile ne sont pas exactement identiques aux vôtres. Elles doivent cependant être similaires.

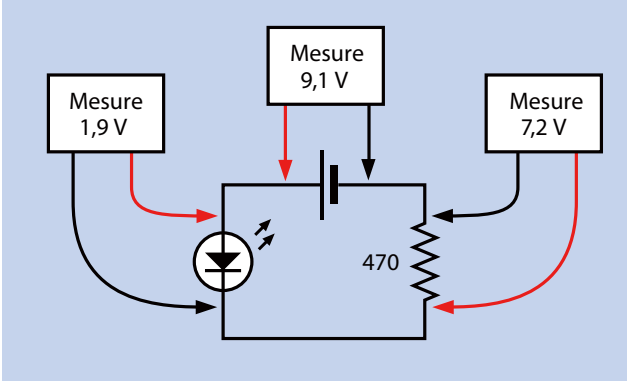


Figure 3-7. *Mesure de tensions en différents points de votre circuit.*

Vous remarquerez que si vous ajoutez les chutes de tension aux bornes des différents composants, le total est égal à la tension de la pile. Les composants absorbent la totalité de ce que la pile fournit, car il n'y a aucun autre élément pour absorber une chute de tension, à part votre multimètre qui ne prélève qu'un faible courant en effectuant la mesure d'une tension.

Voici un ensemble de points à se rappeler concernant la mesure des tensions :

- Le circuit doit être sous tension.
- Le multimètre est réglé pour la mesure des tensions.
- Le multimètre est relié par l'extérieur du circuit.
- Une tension étant similaire à une pression, vous devez toujours la mesurer entre deux points dont l'un à une

tension supérieure par rapport à l'autre. C'est ce que l'on appelle la *différence de potentiel* entre ces points.

- Si vous reliez le multimètre dans le mauvais sens, il fera tout de même la mesure, mais vous verrez un signe moins apparaître sur l'afficheur.

La tension aux bornes de la LED est appelée sa *tension directe*, dont la valeur typique suggérée par la fiche technique de la figure 2-13 se situe entre 2,1 volts et 2,6 volts. Le circuit de cette expérience fournit donc une valeur légèrement inférieure au minimum préconisé.

Dans le cas d'une LED, ce qui est indiqué dans les fiches techniques signifie que *si* vous appliquez une tension comprise entre 2,1 et 2,6 volts, *alors* la LED se comportera selon les spécifications du fabricant, notamment en ce qui concerne sa luminosité.

Fondamentaux : le volt

Le volt est l'unité internationale dont le symbole est la lettre majuscule **V**. Un millivolt (noté **mV**) est égal à 1/1 000e de volt. Dans les expériences de ce livre, vous ne mesurerez pas de valeurs en microvolts.

```
1 V = 1000 mV
```

Des valeurs intermédiaires sont indiquées sur la figure 3-8. Les kilovolts se rencontrent dans les environnements tels que les lignes de transport d'électricité.

Millivolts	Volts	Kilovolts
1 mV	0,001 V	0,000001 kV
10 mV	0,01 V	0,00001 kV
100 mV	0,1 V	0,0001 kV
1 000 mV	1 V	0,001 kV
10 000 mV	10 V	0,01 kV
100 000 mV	100 V	0,1 kV
1 000 000 mV	1 000 V	1 kV

Figure 3-8. *Table de conversion des tensions.*

Historique : l'invention de la pile

Alessandro Volta (figure 3-9) est né en Italie en 1745, bien avant que la science ne soit organisée en spécialités. Après avoir étudié la chimie (il a découvert le méthane en 1776), il devint professeur de physique et développa un intérêt pour ce qu'il appela la réponse galvanique, en observant la contraction de la cuisse d'une grenouille recevant une décharge d'électricité statique.

En utilisant un verre rempli d'eau salée, Volta mit en évidence la réaction chimique entre deux électrodes (l'une en cuivre, l'autre en zinc) générant un courant électrique constant. En 1800, il perfectionna son appareil en empilant plusieurs plaques de cuivre et de zinc séparées par des feuilles de carton trempées dans de l'eau et du sel. Cette structure « voltaïque » a été la première pile électrique de la civilisation occidentale.

Figure 3-9. *Alessandro Volta a découvert qu'une réaction chimique peut produire de l'électricité.*

Pouvez-vous imaginer vivre une période durant laquelle vous auriez pu faire une découverte majeure dans le domaine de l'électricité, en utilisant uniquement une paire de plaques métalliques, de l'eau salée et un peu de carton ?

Fondamentaux : tension vs intensité

Vous avez constaté que si vous diminuez une résistance, un courant plus élevé circule. Que se passerait-il si vous augmentiez la tension tout en conservant la même résistance ? Pensez-vous que ce soit une autre façon d'augmenter l'intensité qui circule ?

Oui, c'est ce qui se passe, et la meilleure façon de le comprendre est d'imaginer que l'électricité se comporte comme de l'eau.

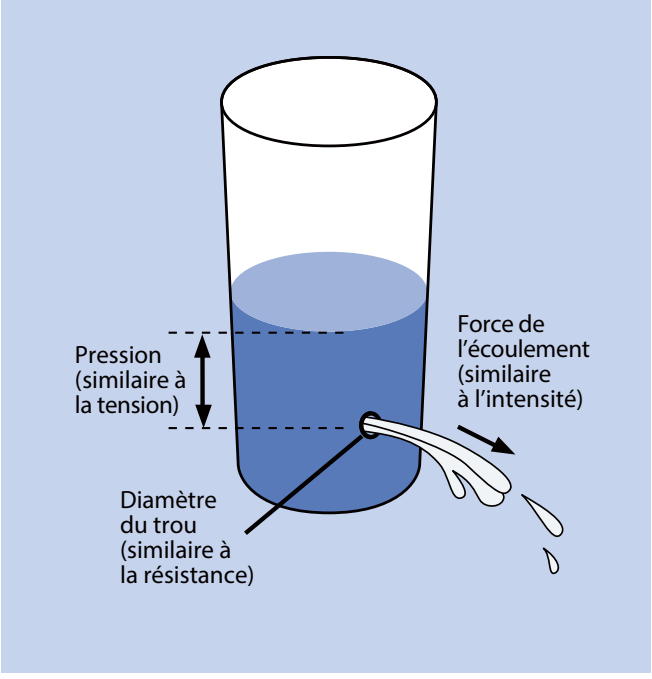


Figure 3-10. *L'analogie avec l'eau.*

En fait, au début de l'histoire de la science, certains chercheurs pensaient que l'électricité était une sorte de fluide, car la circulation des électrons se comportait ainsi.

Sur la figure 3-10, la hauteur de l'eau dans le cylindre par rapport au trou, va créer la pression de l'eau. L'importance de l'écoulement sera similaire à l'intensité du courant, et le diamètre du trou sera comparable à la résistance. Si vous ajoutez de l'eau dans le cylindre, vous augmentez la pression, comme sur la figure 3-11. Si le trou du cylindre est toujours de même diamètre, l'augmentation de pression engendrera un courant plus important.

- Comparez la tension à une pression. Elle se mesure entre deux points.
- Comparez le courant qui circule au débit d'un écoulement. C'est l'intensité.
- Comparez la résistance à une limitation de l'écoulement.

Sur la figure 3-12, vous pouvez voir une autre façon de représenter la situation.

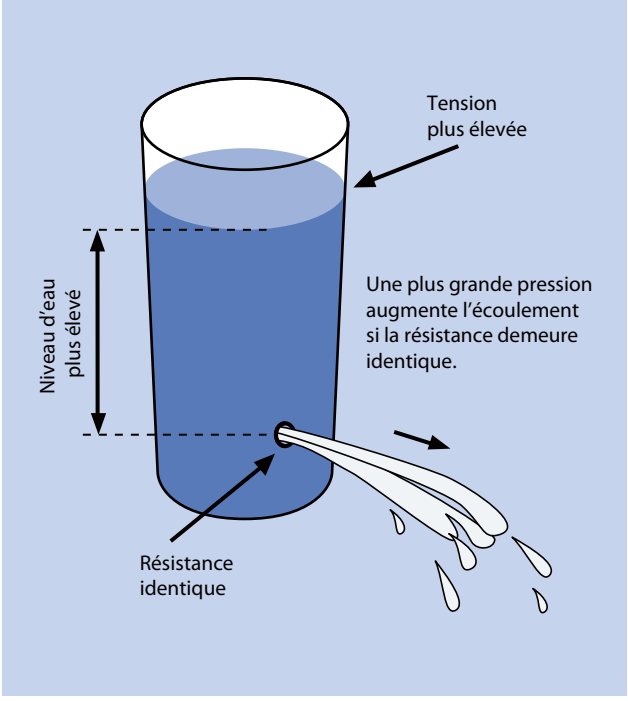


Figure 3-11. *Quand la pression augmente, le courant augmente, si la résistance demeure identique.*

Je souhaite maintenant connaître ***exactement*** la relation existant entre la tension, l'intensité, et la résistance. Par chance, c'est assez facile à découvrir.

Astérisques et parenthèses

Cette expérience va nécessiter la mise en œuvre de quelques calculs simples dans lesquels je vais utiliser les symboles suivants :

`-` la soustraction

`+` l'addition

`/` la division

`*` la multiplication

Le dernier de cette liste est le seul qui peut paraître surprenant. La raison pour laquelle j'utilise un astérisque pour la multiplication et non le symbole × tient au fait que la plupart des langages informatiques utilisent un astérisque de la même façon.

Je vais également utiliser des *parenthèses* parfois nommées *crochets* alors que [et] sont réellement des crochets, et que (et) sont des parenthèses.

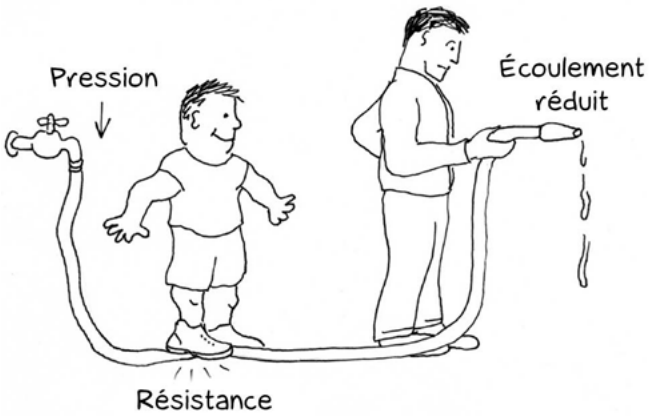


Figure 3-12. *Autre analogie pour la tension électrique, l'intensité et la résistance.*

Supposons que je pose l'addition suivante :

```
A = 13 * ( 12 / ( 7 - 3 ))
```

Si vous vous demandez quelle opération vous devez faire en premier, les parenthèses vous guident. Notez qu'une paire de parenthèses est à l'intérieur d'une autre paire. Vous devez toujours commencer par la paire la plus intérieure.

Dans notre cas, `(7 - 3)` qui vaut `4`. Vous pouvez ainsi simplifier la formule de la façon suivante :

```
A = 13 * ( 12 / 4)
```

Et puisque `12 / 4` est à l'intérieur de parenthèses, effectuons cette division, et remplaçons par

```
A = 13 * 3
```

Ainsi, la réponse est `A = 39`.

Les mêmes règles s'appliquent si vous utilisez des lettres pour représenter des valeurs telles que les tensions ou intensités. Commencez toujours par le contenu des parenthèses les plus imbriquées, et remontez vers l'extérieur.

C'est la loi !

Le but de cette expérience est de réaliser quatre mesures et d'en tirer les conclusions concernant le fonctionnement de l'électricité. C'est ainsi que la science est faite : pour commencer il vous faut quelques données, vous pouvez alors les utiliser pour en tirer des conclusions.

Déconnectez vos composants et mettez la LED de côté. Vous n'en aurez pas besoin pour l'instant. Quatre résistances de valeurs 1K, 1,5K, 2,2K et 3,3K vous seront nécessaires.

Vérifiez la tension de votre pile selon la figure 3-13. Faites-le avec votre multimètre réglé pour la mesure des tensions, car ainsi il présente une résistance électrique très élevée qui le protège de la traversée d'un courant trop élevé. Ne faites jamais cela avec votre multimètre réglé pour la mesure des intensités en mA ; vous pourriez alors griller le fusible de l'appareil. Notez la valeur que vous trouvez.

Déplacez maintenant le cordon de mesure rouge de votre multimètre à la borne mA, s'il en possède une, et réglez-le pour mesurer jusqu'à 20 mA (ou 200 mA si le calibre ne descend pas à 20 mA). Je veux que vous fassiez les quatre mesures de la figure 3-14 qui indiquent les valeurs que j'ai obtenues, limitées à deux chiffres.

Notez que j'ai inclus la tension de ma pile, qui était de 9,6 V, car il s'agissait d'une pile neuve.

J'ai ensuite copié ces valeurs dans un tableau sur la figure 3-15. Pour remplir la dernière colonne, j'ai utilisé ma calculatrice pour multiplier les valeurs en milliampères et en kilohms. Faites-en de même avec vos valeurs. Une fois encore, j'ai arrondi les valeurs à une seule décimale.

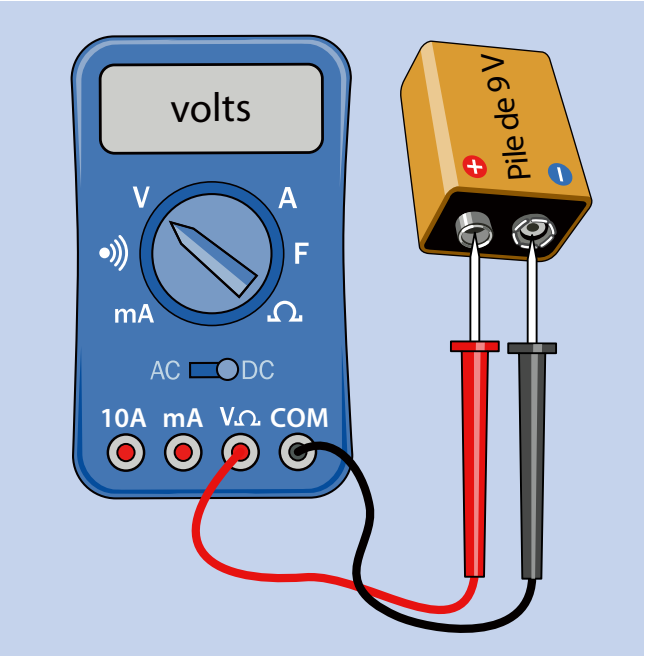


Figure 3-13. *Si votre multimètre est réglé pour la mesure des tensions, vous pouvez faire cette vérification.*

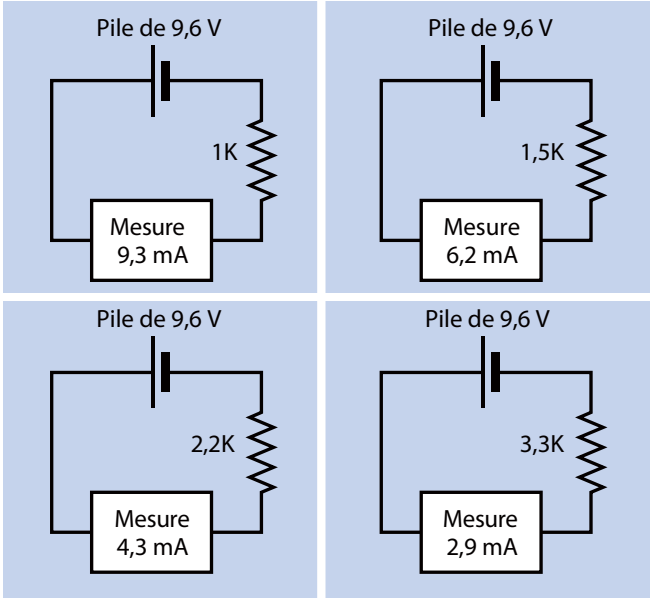


Figure 3-14. *Quatre mesures obtenues avec quatre résistances différentes.*

Constatez-vous quelque chose d'étrange dans ce tableau ? Les valeurs dans la dernière colonne sont toutes très similaires. Et elles sont toutes proches de la valeur de la tension de la pile.

Chaque fois que vous constatez une telle coïncidence, vous devez vous interroger pour savoir s'il n'existe pas une loi. Si vous faisiez des recherches sérieuses, pour vous en assurer, vous devriez réessayer de nombreuses fois, en utilisant d'autres résistances et différentes sources d'alimentation électrique. Mais je peux vous assurer que les résultats seraient toujours les mêmes. Cela s'énoncerait ainsi :

```
volts = milliampères * kilohms
```

soit

tension (en V) = **intensité** (en mA) * **résistance** (en kilohms)

Intensité en mA	Valeur de la résistance en kilo-ohms	mA * K
9,3	1	9,3
6,2	1,5	9,3
4,3	2,2	9,5
2,9	3,3	9,6

Figure 3-15. *Tables des valeurs obtenues lors des mesures de la figure 3-14*

Je peux reformuler en utilisant les unités de base ampères, volts et ohms au lieu de milliampères, volts et kilohms. Rappelez-vous :

```
1 mA = 1 A / 1000
```

```
1K = 1 ohm * 1000
```

Ainsi :

```
volts = (ampères / 1000) * (ohms * 1000)
```

Mais les milliers s'éliminent et la formule devient :

```
volts = ampères * ohms
```

Supposons que j'utilise la lettre V pour la tension en volts, la lettre R pour la résistance en ohms et la lettre I pour

l'intensité en ampères. Pourquoi la lettre I ? Parce que le courant est mesuré par les effets qu'il *induit*.

C'est un sujet complexe, mais dans toute formule électronique, quand vous voyez I, cela indique le courant (ou intensité). Ainsi :

```
V = I * R
```

Souvenez-vous que V doit être exprimé en volts, I en ampères et R en ohms. Il s'agit de la *loi d'Ohm*, la formule de base essentielle en électronique. Vous venez juste de la découvrir, ou plutôt, de la redécouvrir.

Sur la figure 3-16, la résistance peut être constituée d'une seule ou de plusieurs résistances en série.

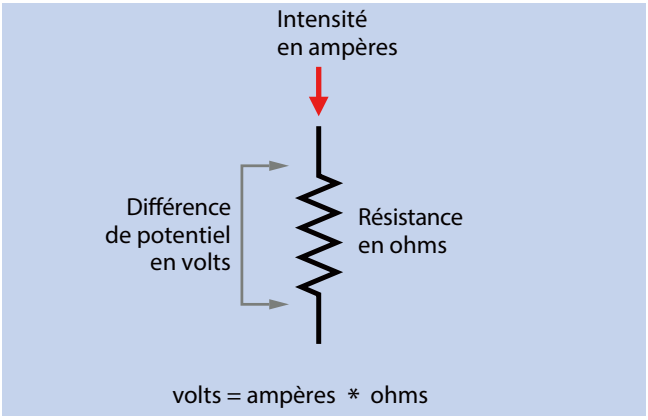


Figure 3-16. *Application de la loi d'Ohm.*

Fondamentaux : conversion de la formule

Si vous vous rappelez de vos cours d'algèbre, vous savez que la formule de la loi d'Ohm peut être réécrite en déplaçant ses termes.

Si vous souhaitez calculer la résistance, vous utiliserez cette version :

```
R = V / I
```

Si vous souhaitez connaître l'intensité, vous utiliserez cette forme :

```
I = V / R
```

Si par contre vous souhaitez calculer la tension, utilisez la formule originale :

```
V = R * I
```

Fondamentaux : conversion décimale

Winston Churchill, le célèbre homme politique, était connu pour se plaindre de ces « maudits points ». Il voulait parler des virgules décimales. En effet, lorsqu'il était chancelier de l'Échiquier (ministre des Finances), il supervisait toutes les dépenses du gouvernement, et sa difficulté avec les décimales était un problème. Il bougonnait toujours avec le charme légendaire britannique, vous pouvez en faire de même.

La loi d'Ohm utilise des valeurs en volts, ampères et ohms, mais souvent vous aurez besoin de convertir les intensités en milliampères et les résistances en kilohms et vice versa. Supposez que vous ayez une valeur de 1,2 mA et souhaitiez l'exprimer en ampères. Lorsque vous convertissez une unité sous-multiple en une unité 1 000 fois plus grande, vous devez déplacer la virgule de trois positions vers la gauche.

```
1,2 milliampère = 0,0012 ampère
```

Supposez maintenant que vous ayez une valeur de 230 ohms et souhaitiez connaître sa valeur en kilohms. Une fois encore, vous convertissez une unité 1 000 fois plus grande. Imaginez qu'il y a une virgule suivant la valeur 230, il s'agit en fait de 230,0. Déplacez maintenant la virgule de trois positions vers la gauche :

```
230 ohms = 0,23 kilohms
```

Vous pouvez également utiliser une calculatrice pour multiplier ou diviser par 1 000.

Influence du multimètre

J'ai omis l'influence exacte que le multimètre pouvait induire durant la mesure d'une tension. J'ai indiqué que sa résistance était très élevée, mais elle devait probablement avoir un effet, même minime ?

Oui, en effet, c'est pourquoi je n'ai pas obtenu un résultat parfait en multipliant `mA * K`. Il n'y a rien que vous ne pouviez faire à ce sujet. J'ai exprimé les valeurs avec deux chiffres car je savais que le multimètre influençait la précision de ses propres mesures.

Cela ne semble pas être très satisfaisant, mais c'est une règle générale en sciences, la façon de mesurer une valeur affecte le résultat de ce que l'on mesure.

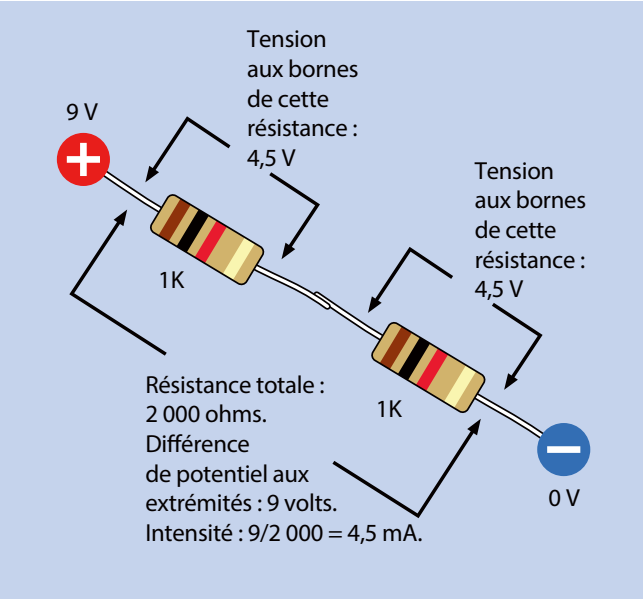


Figure 3-17. *Pour connaître la valeur de deux résistances en série, il suffit d'additionner leurs valeurs.*

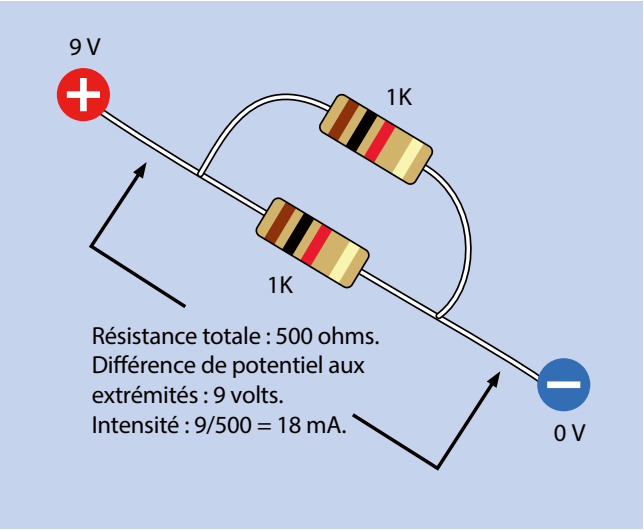


Figure 3-18. *Pour connaître la valeur de deux résistances identiques en parallèle, il suffit de diviser la valeur d'une des résistances par 2.*

Fondamentaux : montages série et parallèle

Dans les circuits simples que vous avez réalisés jusqu'à présent, le courant électrique s'écoulait d'un composant vers le suivant. Les composants étaient reliés en *série*.

> *Quand vous avez deux résistances en série, vous ajoutez leurs valeurs pour obtenir la résistance totale qu'elles représentent. Voir la figure 3-17.*

Qu'en est-il si vous placez deux résistances identiques l'une sur l'autre, comme sur la figure 3-18 ? Le courant électrique suit maintenant deux chemins, la résistance globale est divisée par 2. On dit que les résistances sont reliées en *parallèle*.

Et dans le cas où les résistances ne sont pas de valeurs égales ? Si elles sont en série, il faut additionner leurs valeurs comme précédemment, mais si elles sont reliées en parallèle, c'est un peu plus délicat.

Vous pourriez l'expérimenter en combinant diverses résistances en parallèle, et utiliser votre multimètre pour mesurer leur résistance équivalente. Mais laissez-moi vous simplifier les choses. Si R1 est la valeur d'une des résistances, et R2 celle de l'autre, et qu'elles sont reliées en parallèle, la résistance équivalente est déterminée par la formule suivante :

```
1 / R = (1 / R1) + (1 / R2)
```

Ce n'est pas très pratique d'obtenir 1 divisé par R quand on cherche R. C'est vrai, mais l'algèbre vous permet de convertir cette formule comme ceci :

```
1 / R = (R1 + R2) / (R1 * R2)
```

Et donc

```
R = (R1 * R2) / (R1 + R2)
```

Aviez-vous réellement besoin de cela ? Eh bien oui, cela peut vous être utile, et je n'aurais pas accompli mon travail si je ne vous en avais pas parlé.

Je suis conscient que certaines personnes n'aiment pas beaucoup l'algèbre, c'est pourquoi je ne vais pas détailler cela davantage. Toutefois, dans la prochaine expérience, je

vais devoir utiliser un peu les mathématiques pour déterminer la *puissance* nécessaire à un circuit. C'est important.

Nettoyage et recyclage

Vous n'utiliserez pas la LED dans l'expérience suivante, et la seule résistance utilisée aura une valeur de 15 ohms. Vous pouvez remiser les résistances que vous n'utiliserez pas en les mettant dans des petits sachets ou enveloppes et inscrire leur valeur. Vous pouvez stocker les résistances inutilisées dans des petits sachets sur lesquels les valeurs seront inscrites. Les boîtes dans lesquelles on range les perles sont toutefois préférables, j'en reparlerai au début de l'expérience 5.

La pile de 9 V devrait encore être bonne.

Expérience 4
Chaleur et puissance

L'électricité peut générer de la chaleur. Vous savez que ce doit être vrai, car il existe des chauffe-eaux, des cuisinières et des sèche-cheveux électriques. D'ailleurs, quand la pile de 9 V a grillé la LED, c'était peut-être parce que la LED devenait trop chaude.

Peut-être ? Je dois à nouveau étudier cela avec des données.

Vous aurez besoin de :

- 1 pile de 9 V
- 1 résistance de 15 ohms, marron-vert-noir
- 1 fusible cartouche de diamètre 5 mm calibré à 1 A
- 1 fusible cartouche de diamètre 5 mm calibré à 3 A
- 2 fils de tests (1 rouge et 1 noir)
- 1 multimètre

Surchauffe d'une résistance

Connectez la résistance de 15 ohms à votre pile comme illustré sur la figure 4-1. Limitez la durée de votre essai ! Vous allez constater que la résistance chauffe très rapidement.

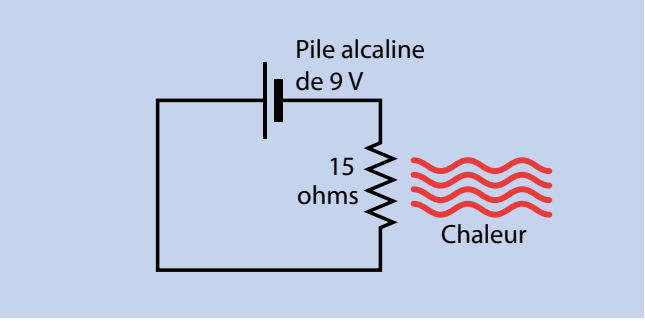


Figure 4-1. *Si vous appliquez une tension de 9 volts aux bornes d'une résistance de 15 ohms, elle s'échauffera rapidement.*

Note importante : ne faites pas cet essai avec une pile plus puissante. Surtout, ne le faites pas en utilisant une batterie au lithium qui alimente un ordinateur portable, un outil sans fil, un smartphone ou tout autre appareil portable. Les accumulateurs au lithium peuvent avoir un comportement dangereux comme le montre la figure 4-2.

Figure 4-2. *Voici la raison pour laquelle il est dangereux de s'amuser avec une batterie au lithium.*

Il serait également dangereux de faire des essais avec une batterie au plomb-acide. Gardez en mémoire qu'une batterie de voiture peut délivrer une puissance suffisante pour souder deux pièces métalliques ensemble. Quiconque n'a jamais laissé tomber une clé plate sur les cosses d'une batterie automobile le sait ; en supposant qu'il ait survécu à cette expérience. C'est pourquoi une batterie de voiture est vendue avec des caches en plastique sur ses bornes de connexions, voir la figure 4-3.

La pile alcaline de 9 V utilisée dans cette expérience ne peut pas délivrer une puissance importante, c'est pourquoi vous pouvez vous amuser avec, en toute sécurité.

Maintenant que vous avez déterminé que les électrons traversant une résistance produisent de la chaleur, j'aimerais en calculer la quantité. Cela exige de manipuler les watts. Au fait ! N'oubliez pas de déconnecter la résistance de 15 ohms !

Fondamentaux : température, chaleur et puissance

La température est un paramètre d'un objet comme sa taille ou son poids.

L'échauffement est le transfert d'énergie d'un endroit à un autre. Ce peut être par conduction, convection, ou radiation, et c'est mesuré en *joules*, dont l'abréviation est la lettre *J*. Si vous vous réchauffez en vous asseyant auprès d'un feu de camp, une énergie calorifique en joules a été transférée du feu à votre corps car la température du feu est supérieure à la vôtre.

Figure 4-3. *S'amuser avec une batterie d'automobile est une mauvaise idée, laisser tomber une clé plate sur ses bornes est encore pire.*

La puissance est définie par la vitesse à laquelle la chaleur est transférée, elle se mesure en *watts*. Un watt correspond à un joule par seconde.

La puissance en watts peut se définir différemment, à partir des unités électriques :

```
watts = volts * ampères
```

Néanmoins, la lettre *P* est souvent utilisée pour représenter la puissance, vous pouvez alors voir cette formulation :

```
P = V * I
```

Quand votre résistance de 15 ohms devient chaude, vous pouvez le ressentir avec votre doigt. En réalité, vous ressentez le transfert de chaleur dans votre doigt, et plus c'est rapide, plus c'est douloureux. De même, plus l'électricité génère rapidement de la chaleur dans un composant, moins celui-ci a de chance de pouvoir écouler cette chaleur dans son environnement. La vitesse de transfert de la chaleur est importante, elle est exprimée en watts.

Fondamentaux : conversion des watts

Les watts peuvent être précédés par la lettre minuscule « m » pour « milli », comme les volts :

```
1 W = 1000 mW
```

Du fait des puissances importantes mises en jeu dans les centrales électriques, les installations solaires ou les parcs éoliens, des nombres plus grands sont utilisés, et vous pouvez voir des références à des kilowatts (utilisant la lettre minuscule « k ») :

```
1 kW = 1000 W = 1000000 mW
```

Les valeurs intermédiaires pour milliwatts, watts et kilowatts sont définies sur la figure 4-4.

Milliwatts	Watts	Kilowatts
1 mW	0,001 W	0,000001 kW
10 mW	0,01 W	0,00001 kW
100 mW	0,1 W	0,0001 kW
1 000 mW	1 W	0,001 kW
10 000 mW	10 W	0,01 kW
100 000 mW	100 W	0,1 kW
1 000 000 mW	1 000 W	1 kW

Figure 4-4. *Table de conversion des unités de puissance.*

La puissance sonore des systèmes stéréophoniques est caractérisée en watts. La puissance lumineuse des lampes d'éclairage et les LED est également définie en watts.

Historique : les origines de la puissance

James Watt (figure 4-5) est considéré comme l'inventeur de la machine à vapeur. Né en 1736 en Écosse, il avait créé un petit laboratoire à l'université de Glasgow où il travaillait à la conception d'un moteur efficace, utilisant la vapeur pour actionner un piston dans un cylindre. Watt étant confronté à des problèmes financiers et de trop rudimentaires possibilités d'usinage du métal, les premières applications n'ont lieu qu'à partir de 1776.

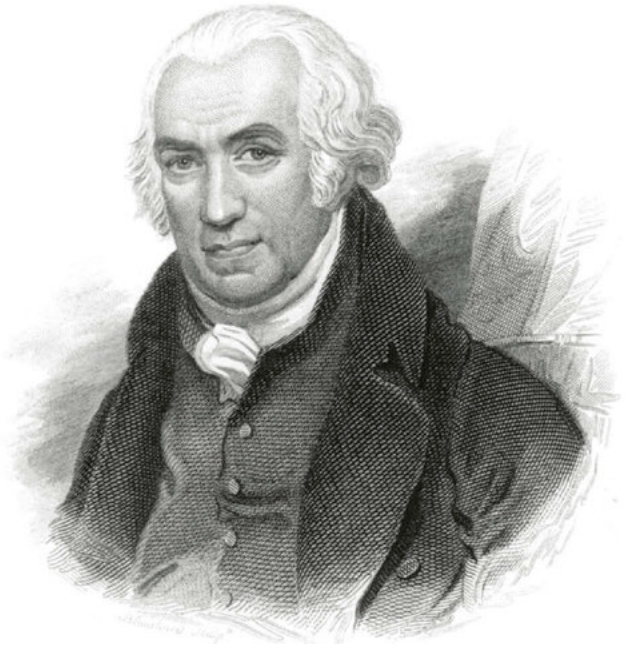


Figure 4-5. *Le développement de la puissance vapeur par James Watt a conduit à la révolution industrielle. Après sa mort, il fut récompensé par le choix de son nom pour représenter l'unité de puissance.*

Malgré ses difficultés à obtenir des brevets – qui ne pouvaient être parrainés que par un acte du Parlement à cette époque – Watt et ses partenaires industriels ont gagné beaucoup d'argent grâce à ses découvertes. En 1889 (70 ans après sa mort), son nom a été choisi comme unité de base de la puissance électrique pouvant se définir comme étant le produit de la tension par l'intensité.

Pourquoi votre langue n'est-elle pas devenue chaude ?

Maintenant que vous savez ce qu'est un « watt », vous pouvez très facilement calculer le transfert de chaleur. Vous avez peut-être pensé que lorsque vous avez mis en contact la pile avec votre langue, celle-ci ne s'échauffait pas ; mais en réalité elle s'était très légèrement échauffée.

A quelle quantité correspond « légèrement » ? Du fait que `watts = volts * ampères`, nous devons déterminer combien d'ampères ont traversé votre langue. Pour cela, je vais utiliser la loi d'Ohm.

Vous pouvez retrouver dans votre carnet de notes les mesures que vous avez faites, supposons que votre langue avait une résistance de 50 000 ohms lorsque vous lui avez appliqué la tension de 9 volts. Vous ne connaissez pas le courant mais pour le savoir, utilisons la loi d'ohm :

```
I = V / R
```

Soit

```
I = 9 / 50000 = 0,00018 ampère
```

Vous pouvez maintenant déterminer la puissance en multipliant la tension par l'intensité

```
W = V * I
```

Donc `W = 9 * 0,00018 = 0,00162 watt`

Cela ferait combien en milliwatts ? Déplacez la virgule de trois positions vers la droite et la réponse est `1,62 mW`.

C'est une quantité infime. La résistance élevée de votre langue a limité le nombre d'électrons par seconde ce qui a limité la quantité de chaleur qu'ils pouvaient produire. C'est pourquoi vous n'avez rien ressenti (à part le picotement dû à la stimulation de vos nerfs par l'électricité).

Pourquoi la résistance est devenue chaude ?

Les résistances que vous avez utilisées sont prévues pour une puissance maximale d'un quart de watt. Vous pouvez acheter des résistances qui supportent des puissances supérieures, mais pour le reste des projets de ce livre, ce n'est pas nécessaire.

Je me demande si la dernière expérience n'a pas induit une puissance un peu trop forte dans la résistance de 15 ohms ?

Une fois encore, commençons par utiliser la loi d'Ohm pour calculer l'intensité. Vous avez relié une résistance de 15 ohms aux bornes de la pile de 9 V donc :

```
I = V / R
```

Soit `I = 9 / 15 = 0,6 ampère.`

Connaissant l'intensité, vous pouvez maintenant déterminer la puissance :

```
W = V * I = 9 * 0,6 = 5,4 watts.
```

Aïe ! Un quart de watt c'est 0,25 watt, vous avez donc appliqué plus de 20 fois la puissance que la résistance pouvait supporter. C'est pour cette raison que je vous ai dit de ne pas la laisser connectée trop longtemps. Pas étonnant si elle a chauffé !

Utilisez un fusible

Les formules que je vous ai indiquées sont prodigieusement simples, mais elles ont leurs limites. Supposons que vous mettiez un morceau de métal entre les bornes de la pile de 9 volts, et que cette pièce métallique ait une résistance de 0,01 ohm. En théorie, la loi d'Ohms indiquerait que la pile générerait une intensité de 900 ampères dans le métal, et quand vous multipliez cette valeur par 9, la puissance serait de 8 100 watts. C'est pratiquement la puissance suffisante pour chauffer entièrement une maison. Pensez-vous pouvoir déconnecter votre habitation du réseau électrique et simplement relier une pile de 9 V au tableau électrique ?

Hum, probablement pas. Il y a une limite à l'intensité du courant qu'une pile peut délivrer du fait que les réactions chimiques qui se produisent à l'intérieur, pour générer de l'électricité, ne se produisent pas suffisamment vite. La loi d'Ohm ne se vérifie que si votre source de courant est stable.

Quelle puissance pouvez-vous obtenir de votre pile ? Vous pourriez relier directement votre multimètre à la pile, réglé pour la mesure des intensités, mais cela ne serait pas bon pour le multimètre. J'ai une solution différente : vous pourriez utiliser un fusible. J'avais montré la photo d'un fusible sur la figure 1-12. Consultez-la, si vous souhaitez vous rafraîchir la mémoire. C'est un *fusible à cartouche*, constitué d'un petit tube en verre avec des capuchons métalliques, contenant un fil très fin, en alliage métallique spécial, qui fond très rapidement quand un courant trop important le traverse. Le rôle d'un fusible est de protéger les autres composants d'un circuit en fondant avant qu'ils aient le temps de griller. C'est ce que l'on appelle *griller un fusible.*

Les fusibles que vous allez utiliser ont un diamètre de 5 mm, vous pouvez facilement les agripper avec vos fils de tests. Vous pouvez également utiliser des fusibles de voitures qui possèdent des petites languettes de connexions.

Un des fusibles doit être calibré pour 1 A et l'autre pour 3 A. Ils paraissent identiques, mais si vous les observez attentivement avec une loupe, une des extrémités de chaque fusible doit avoir l'inscription 1 A ou 3 A gravée avec d'autres indications numériques ou littérales.

Après avoir vérifié les fusibles, ne les confondez pas ! Vous pourriez par exemple les différencier par un petit point de couleur en utilisant un stylo marqueur.

Un fusible n'a pas de polarité. Vous pouvez l'utiliser dans n'importe quel sens.

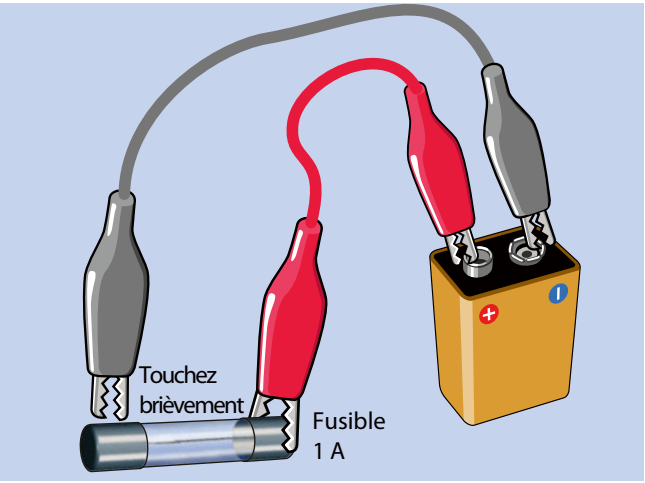


Figure 4-6. *Comment griller un fusible de 1 A.*

Commencez avec le fusible de 1 ampère. Reliez-le à la pile selon la figure 4-6. Appuyez la pince crocodile sur le fusible, uniquement pendant deux secondes. Cela devrait suffire

pour le faire fondre. Ne vous inquiétez pas que le fusible devienne chaud, l'élément interne du fusible fondra rapidement, avant que vous ne puissiez ressentir la chaleur du fusible.

Le schéma de la figure 4-6 est représenté sur la figure 4-7 et montre une variété de symboles qui sont utilisés pour représenter un fusible. Pourquoi y en a-t-il autant ? Je ne sais vraiment pas. Il y en a même d'autres que je ne vous montre pas ici. J'ai uniquement retenu les plus courants.

Retirez le fusible du circuit, et observez-le de près. (Ne vous approchez jamais d'un fusible encore parcouru par un courant. C'est une mauvaise habitude, car si un fusible est très fortement surchargé, il peut exploser violemment.)

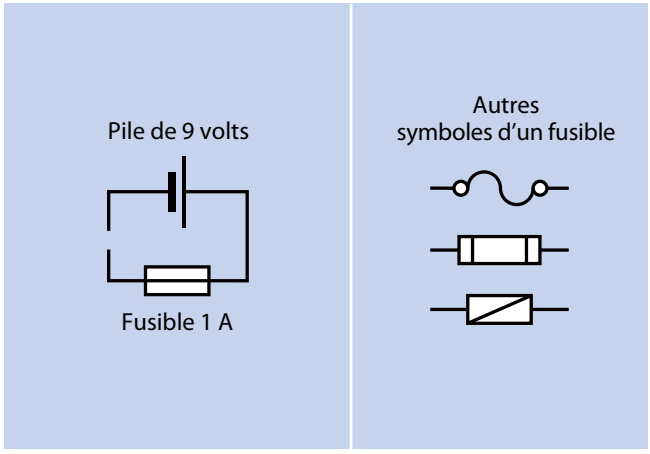


Figure 4-7. *Schéma du circuit de la figure 4-6.*

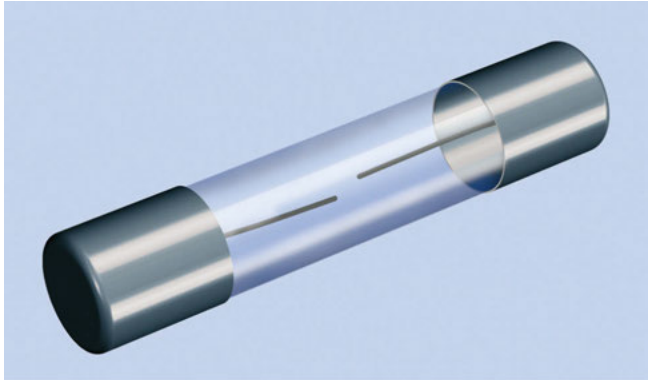


Figure 4-8. *Ce fusible a fondu.*

Voyez-vous une rupture dans l'élément ? Il devrait ressembler à celui de la figure 4-8. Si vous ne voyez pas la coupure, répétez l'expérience pendant trois secondes.

> *Les fusibles ne sont pas calibrés avec précision. Certains fusibles de 1 ampère peuvent exiger un courant plus important que d'autres pour fondre.*

Si vous avez fait fondre le fusible de 1 ampère, en supposant qu'il était correctement calibré, vous pouvez être certain qu'un courant plus élevé l'a traversé. Mais de combien ?

Essayons le fusible de 3 ampères. Recommencez l'essai, mais cette fois, laissez le fusible connecté pendant quatre secondes. Retirez le fusible et vérifiez son état. Je souhaite, et j'espère, que ce fusible n'a pas fondu. C'est le cas n'est-ce pas ? Vous savez maintenant que le courant était supérieur à 1 ampère mais inférieur à 3 ampères, en considérant toujours les fusibles correctement calibrés. Même s'ils étaient mal calibrés, le fusible de 3 ampères devrait fondre plus sûrement qu'un fusible de 10 ampères. Il serait intéressant de mesurer l'intensité du courant avec votre multimètre, pour autant que vous utilisiez la borne marquée **10A** ou **20A,** mais je laisserai le fusible de 3 ampères dans le circuit, par sécurité.

Réalisez le circuit de la figure 4-9. Cette fois, vous devez être absolument certain que le cordon de mesure rouge de votre multimètre est inséré dans la borne marquée **10A** ou **20A**. Réglez le bouton de sélection pour la mesure des intensités (il y aura probablement une position spécifique pour les mesures jusqu'à 10 A ou 20 A). Mettez en contact de façon brève la sonde du multimètre et le fusible, juste assez longtemps pour lire la valeur mesurée. Que voyez-vous ? Lorsque je l'ai fait, j'ai obtenu 1,6 A. Les multimètres ne sont pas conçus pour supporter des courants élevés de façon prolongée, même en utilisant la borne **10A** ou **20A**. Ils peuvent supporter l'intensité maximum pendant environ 15 secondes après quoi ils nécessitent une période de refroidissement d'environ une demi-heure.

Après cet essai, réinsérez votre cordon rouge dans la borne volts-ohms de votre multimètre. Vous pouvez maintenant relier directement votre multimètre à la pile afin de mesurer sa tension, comme vous l'avez fait selon la figure 3-13.

La tension de ma pile était de 8,73 V. Vous avez dû accumuler une série de mesures dans votre carnet de notes,

vous pouvez ainsi, constater les effets des essais effectués sur la pile. Les piles ne durent pas très longtemps quand elles sont chargées au-delà des limites pour lesquelles elles ont été conçues.

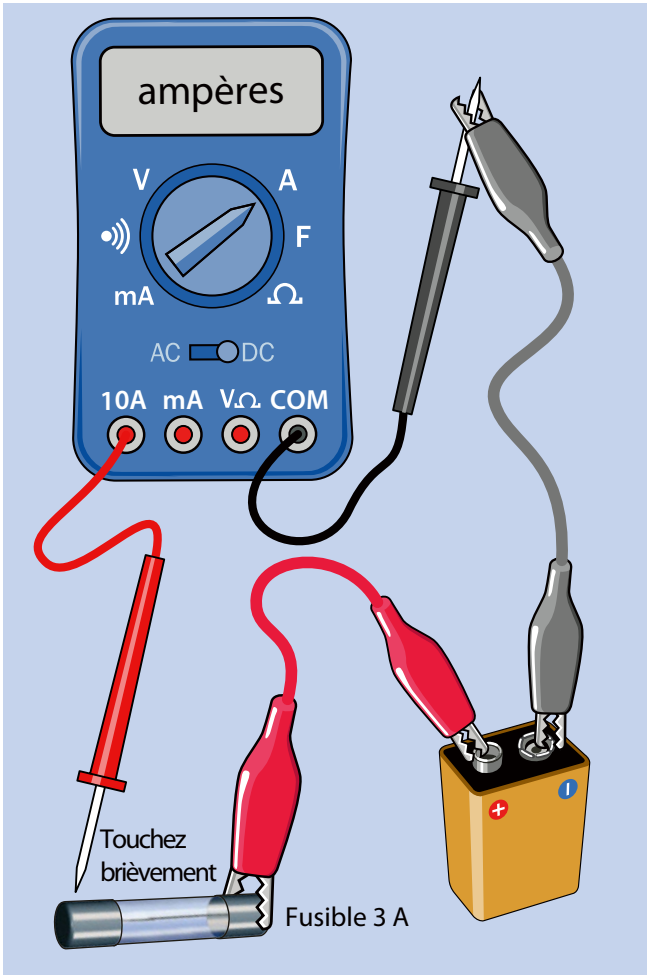


Figure 4-8. *Mesure de l'intensité que vous pouvez obtenir d'une pile de 9 V.*

Conclusions sur l'intensité

Que pouvez-vous conclure à partir de cette expérience ?

- Une petite pile de 9 V peut délivrer un courant supérieur à 1 ampère. En théorie, cela serait suffisant pour allumer 50 LED qui seraient reliées en parallèle.
- En délivrant une telle intensité pendant quelques secondes, la pile s'épuisera.

Selon la loi d'ohms, quelle intensité la pile *aurait dû* délivrer au travers du fusible ? Eh bien en fait, cela dépend de la résistance du circuit. Vous pensez probablement que la résistance d'un multimètre et d'un fusible reliés en série est presque nulle, mais en réalité, un fusible a une résistance supérieure à celle d'un morceau de fil conducteur ordinaire. Vous pouvez le retirer de votre circuit et le mesurer à l'aide de votre multimètre. Mon fusible a une résistance d'environ `0,5 ohm`.

Mais qu'en est-il du multimètre lui-même ? Vous ne pouvez pas lui demander de mesurer sa propre résistance, mais vous pouvez consulter ses spécifications. La résistance interne de mon multimètre est d'environ `0,5 ohm` en utilisant la borne `10A`.

Vous avez également utilisé des fils de tests. Vous pourriez penser que leur résistance est proche de zéro, mais je pense que depuis une dizaine d'années, les fabricants ont économisé sur la section des fils de tests. Pour le savoir, j'ai relié en série dix fils et mesuré une résistance de `2 ohms`. Cela comprend la résistance de contact des pinces crocodiles. Deux fils de tests présentent donc une résistance d'environ `0,4 ohm`, voire davantage si vous utilisez des fils plus longs. Il en est de même des cordons de mesures.

Le multimètre, le fusible et les fils étant reliés en série dans cette expérience, vous avez chargé la pile par une résistance d'environ `1,5 ohm`. Selon la loi d'Ohm :

```
I = V / R = 9 / 1,5 = 6 ampères
```

Il reste encore un paramètre supplémentaire. La pile, possède également une résistance interne ! Selon les informations que j'ai trouvées, une pile alcaline de 9 V possède une résistance interne d'environ 1,5 ohm. La pile aurait donc dû délivrer un courant de 3 ampères, mais comme je l'ai dit précédemment, la loi d'Ohm ne s'applique pas nécessairement quand on pousse les composants au-delà de leurs limites.

Nettoyage et recyclage

Vous pouvez maintenant jeter le fusible qui a fondu.

La pile peut encore servir, cela dépend de la durée pendant laquelle elle a été reliée au fusible. Conservez-la pour la suite si sa tension est égale ou supérieure à 8,7 V, mais pensez à la vérifier à nouveau avant de l'utiliser dans des expériences futures.

Les piles sont recyclables dans la plupart des régions. Dans certains lieux, leur recyclage est imposé par la loi.

Expérience 5
Fabriquons une pile

Il y a longtemps, bien avant l'existence du web, les enfants ayant peu d'occupations s'amusaient à réaliser des bricolages sur un coin de table, comme par exemple fabriquer une pile en enfonçant un clou et une pièce de monnaie dans un citron. Dur à croire, mais vrai !

Cette vieille expérience de la pile-citron est devenue plus intéressante maintenant que nous avons les LED qui peuvent réagir à un courant très faible. Si vous ne l'avez jamais essayé, c'est le bon moment.

Vous aurez besoin de :

- 2 citrons, ou de préférence, une bouteille de pur jus de citron
- 4 pièces de monnaie en cuivre ; si vous résidez dans un pays où de telles pièces n'existent pas, consultez l'annexe A page 331 où d'autres possibilités sont indiquées
- au minimum 4 supports en acier zingué ou plaques de fixation d'un magasin de bricolage
- 5 fils de tests (1 rouge, 1 noir et 3 d'une autre couleur)
- 1 multimètre
- 1 LED générique

Préparation

Une pile est un dispositif *électrochimique*, c'est-à-dire que des réactions chimiques créent de l'électricité. Évidemment, cela ne fonctionne que si vous utilisez les produits chimiques adéquats, et ceux que je vais utiliser sont le cuivre, le zinc et le jus de citron.

Le jus de citron ne devrait pas être difficile à trouver, c'est peu coûteux, vous pouvez également acheter des petites bouteilles de jus concentré.

Les pièces de monnaie ne sont plus en cuivre mais certaines sont cuivrées, ce qui est satisfaisant. Assurez-vous d'utiliser des pièces neuves et brillantes. Si le cuivre est oxydé, elles seront ternes, de couleur marron foncé, et l'expérience ne fonctionnera pas aussi bien.

Le zinc est un peu plus problématique. Vous devez utiliser une plaque en acier galvanisé, c'est-à-dire recouvert de zinc pour éviter l'apparition de rouille. Des petits supports en acier galvanisé d'environ 25 mm de côté ou des plaques de fixation de 50 mm de long devraient être disponibles dans votre magasin de bricolage local. Une finition galvanisée est de couleur gris-argent.

Test du citron

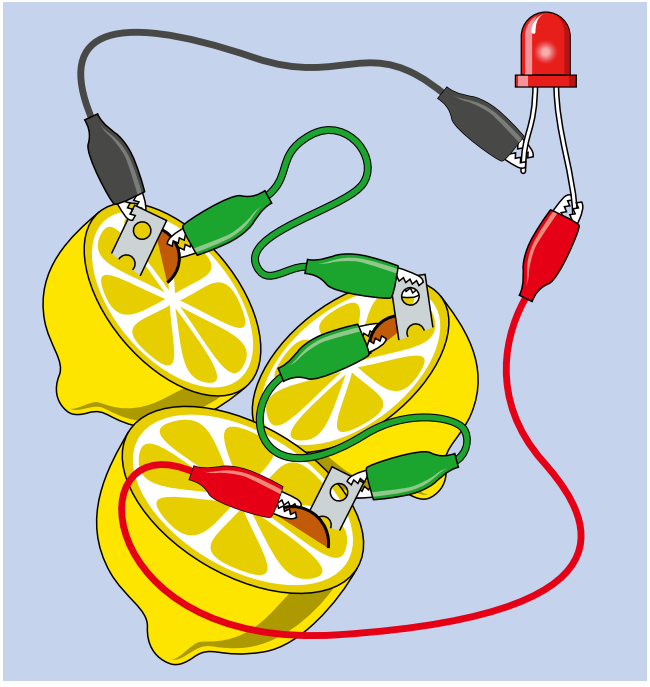


Figure 5-1. *Une pile au citron comportant trois cellules devrait générer suffisamment de courant pour alimenter une LED.*

Coupez un citron en deux, puis insérez une pièce de monnaie dans sa chair. Le plus près possible de la pièce, mais *sans la toucher*, insérez votre élément en métal galvanisé. Réglez votre multimètre pour la mesure d'une tension continue de 2 V maximum et mettez en contact le fil rouge du cordon de mesure avec la pièce de monnaie et le fil noir avec la plaque galvanisée. Votre multimètre devrait indiquer une valeur comprise entre 0,8 et 1 V.

Pour alimenter votre LED, vous devez appliquer une tension plus importante. Comment l'obtenir ? Simplement en reliant plusieurs piles en série. En d'autres termes, davantage de citrons ! Utilisez des fils de tests pour relier les piles comme sur la figure 5-1.

Notez que chaque fil relie une plaque à une pièce de monnaie. Ne connectez pas les pièces de monnaie ou les plaques galvanisées ensemble Si vous faites cela soigneusement, en maintenant un faible espace entre les pièces et les plaques, mais en évitant qu'elles ne se touchent, vous devriez pouvoir allumer votre LED en reliant en série trois piles au citron ainsi constituées. Une autre solution utilise des petites boîtes de rangement, comme le montre la figure 5-2. Les compartiments des boîtes créent des cellules pouvant être facilement reliées en série, cela permet également d'agripper plus facilement les pièces et les plaques.

Figure 5-2. *Du jus de citron provenant d'un fruit ou d'un bouteille de concentré produira un résultat correct.*

Lorsque tout est correctement en place, versez un peu de jus de citron concentré. Du vinaigre ou du jus de pamplemousse peut également convenir.

J'ai choisi de disposer de quatre cellules pour ma pile à jus, car la charge induite par la LED fait chuter quelque peu

la tension globale, et cette pile ne délivre pas une intensité suffisante pour provoquer un quelconque dommage. Votre pile au jus de citron possède en réalité une résistance interne assez élevée !

La réalisation montrée sur la photo a fonctionné immédiatement.

Fondamentaux : nature de l'électricité

Afin de comprendre pourquoi la pile au citron fonctionne, vous devez connaître un certain nombre d'informations de base au sujet des atomes Chaque atome est constitué d'un noyau en son centre, contenant des particules appelées *protons*, qui ont une charge positive. Le noyau est entouré par des *électrons*, qui portent une charge négative. Comme je l'ai mentionné précédemment, le courant électrique est constitué d'électrons.

Casser le noyau d'un atome exige beaucoup d'énergie ; comme cela se produit dans une explosion nucléaire. Par contre, demander à un couple d'électrons de quitter (ou rejoindre) un atome exige relativement peu d'énergie. Quand un atome a perdu ou acquis un ou plusieurs électrons, il devient un *ion*. S'il est en manque d'électrons c'est un *ion positif* ; s'il a un surplus d'électrons, c'est un *ion négatif*.

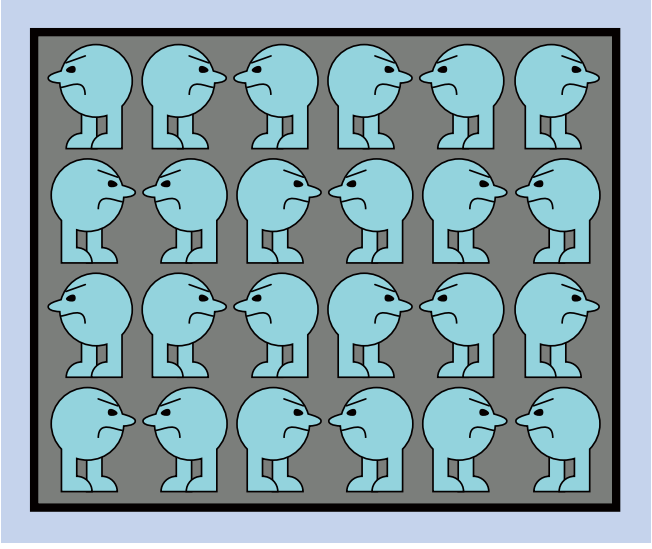


Figure 5-3. *Groupe d'électrons subissant une répulsion mutuelle.*

La réaction chimique entre le zinc et le jus de citron extrait des ions positifs de zinc de l'électrode en zinc, laissant des électrons en surplus. Ces électrons sont libres de se déplacer, mais où ?

Je pense aux électrons comme à des petits personnages au mauvais caractère. Comme eux, ils souffrent de répulsion mutuelle, illustrée sur la figure 5-3. Votre pile au citron leur offre une opportunité de se libérer, comme sur la figure 5-4. Ils peuvent se déplacer le long d'un fil, au travers d'une charge telle qu'une LED.

Ils perdent un peu de leur énergie dans la charge mais ils continuent leur déplacement jusqu'à l'électrode en cuivre. Le jus de citron entourant le cuivre contient des ions d'hydrogène positifs qui sont ravis d'accueillir des compagnons à charge négative.

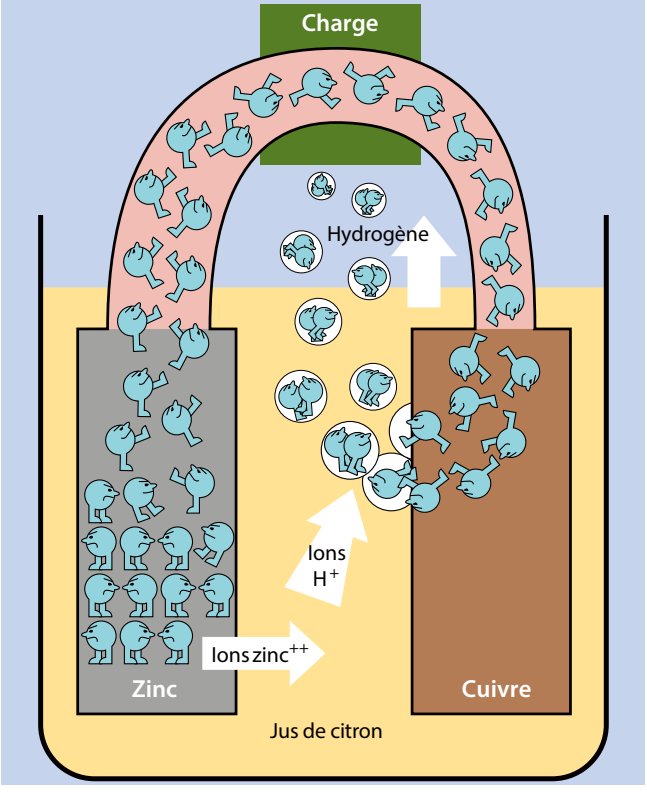


Figure 5-4. *Électrons libérés d'une pile à jus de citron.*

Des paires d'électrons quittent le cuivre et se fixent aux ions d'hydrogène, formant alors de fines bulles de gaz

hydrogène. Les bulles s'échappent du jus de citron et les électrons partent avec leurs nouveaux amis, en quête de nouvelles aventures.

La réalité n'est pas aussi simple que je ne l'ai laissé entendre, je vous laisse le soin de lire davantage à ce sujet, si vous souhaitez connaître la totalité du mécanisme.

Cette description s'applique à une *pile à cellules primaire*, c'est-à-dire qu'elle est prête à fournir de l'électricité dès qu'une connexion à ses bornes permet aux électrons de se déplacer d'une électrode vers l'autre. La quantité de courant qu'une pile primaire peut générer dépend de la vitesse à laquelle les réactions chimiques internes peuvent libérer des électrons. Quand le matériau métallique des électrodes est entièrement utilisé par les réactions chimiques, la pile ne peut plus produire d'électricité, elle est morte. Elle ne peut pas être aisément réactivée, car les réactions chimiques ne sont pas facilement réversibles, et les électrodes peuvent avoir été détruites.

Dans une pile rechargeable, également appelée *pile à cellules secondaires*, un choix plus judicieux des électrodes et de l'électrolyte permet aux réactions chimiques d'être réversibles.

Fondamentaux : confusion entre positif et négatif

Je vous ai expliqué que l'électricité était un flux d'électrons, lesquels possèdent une charge négative. En ce cas, pourquoi, durant les expériences précédentes, vous ai-je dit que le courant électrique se déplaçait de la borne positive d'une pile pour rejoindre son pôle négatif ?

La réponse trouve son origine en 1747. Benjamin Franklin conclut alors, de ses observations des orages, que les éclairs se déplaçaient depuis des nuages chargés positivement jusqu'au sol de la Terre.

En fait, il avait partiellement raison : certains nuages d'orages peuvent avoir une charge positive plus élevée que celle de la terre, et dans ces conditions, une personne qui est foudroyée par un éclair est heurtée par une décharge électrique traversant son corps de bas en haut et s'échappant par le sommet de son crâne, comme le montre la figure 5-5.

L'erreur de Benjamin Franklin n'a pas été comprise jusqu'en 1897 quand le physicien J. J. Thomson annonça avoir découvert l'électron et prouvé que l'électricité est un flux de particules chargées négativement. Dans une pile, les électrons sont issus de l'électrode négative et s'écoulent vers l'électrode positive. On pourrait penser qu'à la suite de cette découverte, tout le monde oublierait l'erreur de Benjamin Franklin. En réalité, le flux de charges négatives vers un endroit plus positif est équivalent au déplacement de charges positives vers un élément plus négatif. Quand un électron quitte une pile, il retire une petite charge négative de cette source, qui devient alors un peu plus positive, comme si une charge positive se déplaçait dans la direction opposée. De plus, toutes les théories mathématiques qui décrivent le comportement de l'électricité sont toujours valables si on les appliquent à un flux imaginaire de charges positives.

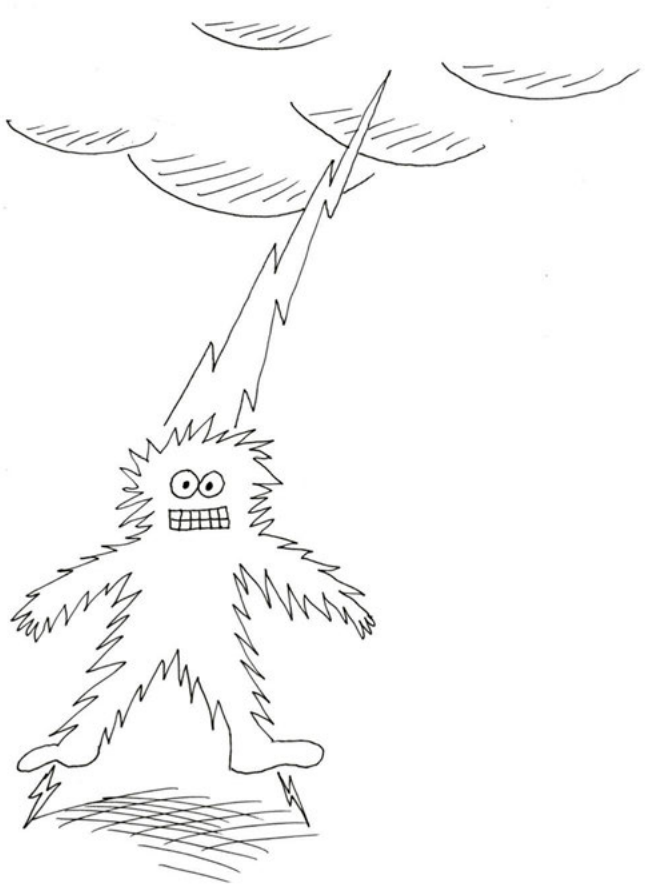


Figure 5-5. *Bien que ce malheureux pense avoir été frappé par la foudre, c'est en fait l'inverse.*

Pour des raisons de facilité et par tradition, le concept d'un flux du pôle positif vers le pôle négatif a survécu, en particulier parce qu'on a raisonné ainsi pendant plus d'un siècle et qu'après tout, cela importe peu.

> *Le courant s'écoulant du positif vers le négatif est maintenant considéré comme le sens* ***conventionnel du courant.***

Dans les symboles de schématique représentant les composants tels que les diodes ou les transistors, vous verrez des flèches vous rappelant dans quel sens ces composants doivent être placés, les flèches pointant toutes du positif vers le négatif. Dans ce livre, je décrirai le courant de cette façon.

Nettoyage et recyclage

Les éléments qui ont baigné dans le jus de citron peuvent être décolorés, mais ils sont réutilisables. Je pense, par contre, que vous devriez éviter de consommer les citrons, car du métal a été déposé à l'intérieur par la réaction chimique.

Chapitre 2

Principes de commutation

Utiliser un *interrupteur* pour contrôler un courant électrique semble être une idée très basique, mais dans ce chapitre, je ne vais pas parler des interrupteurs que vous actionnez avec votre doigt. Un courant électrique peut contrôler un autre courant, en utilisant un *relais* ou un *transistor*. Ce type de commutation est primordial, tous les circuits digitaux en dépendent.

Dans ce chapitre, je vais également aborder les *condensateurs*, car leur importance en électronique est aussi fondamentale que celle des résistances.

Comme dans le chapitre I, je vais commencer par une liste des outils, composants et fournitures afin que vous les reconnaissiez aisément. Vous possédez peut-être quelques-uns de ces éléments, mais si ce n'est pas le cas, rendez-vous à la fin de ce livre pour apprendre à vous les procurer :

- Voir l'annexe A pour trouver les spécifications que vous devez connaitre pour faire vos achats.
- Voir l'annexe B où se trouvent les adresses en ligne, ou les magasins que je vous recommande pour effectuer vos achats.

Tournevis miniatures

Vous aurez besoin de *tournevis miniatures* convenant aux petites vis que vous trouverez sur certains composants électroniques. Je vous suggère un ensemble tel que celui de la figure 6-1.

Certains ensembles peu couteux ressemblent à celui que je vous montre, mais si vous dépensez un peu plus, vous aurez un assortiment dont la qualité des matériaux et de la fabrication est bien supérieure.

Figure 6-1. *Tournevis miniatures, quatre à lames plates, quatre de type Philips.*

Essentiel : pince à bec long

Le type de *pince à bec long* dont vous aurez besoin ne doit pas dépasser 13 cm de longueur totale. Vous l'utiliserez pour plier des fils avec précision, ou pour saisir de petites pièces aux endroits où vos doigts et votre pouce sont trop gros et peu adroits. La pince de la figure 6-2 possède des poignées munies d'un ressort, toutefois certaines personnes préfèrent les pinces sans ressort.

Vous n'allez pas utiliser cette pince pour faire un travail demandant beaucoup de force, c'est pourquoi, vous pouvez acheter les pinces les moins couteuses que vous trouverez.

Figure 6-2. *Les pinces convenant pour des travaux d'électronique ne doivent pas avoir une longueur supérieure à 13 cm.*

Essentiel : pince coupante

Les pinces plates possèdent en général une partie coupante près de leur articulation, mais pour couper un fil dans une partie peu accessible, vous aurez besoin d'une *pince coupante* telle que celle de la figure 6-3. Elle ne devrait pas mesurer plus de 13 cm. Il n'est pas nécessaire qu'elle soit de grande qualité, vous n'aurez à couper que des fils de cuivre mou.

Comme les pinces plates, les pinces coupantes peuvent être munies de poignées avec ou sans ressort.

Figure 6-3. *Les pinces coupantes ne doivent pas excéder 13 cm de longueur.*

Optionnel : pince coupante de précision

La *pince coupante de précision* de la figure 6-4 est plus fine et plus petite qu'une pince coupante traditionnelle, mais probablement moins robuste. Que vous préfériez une pince coupante de précision aux pinces coupantes classiques est une affaire de choix personnel.

Figure 6-4. *Pince coupante de précision pouvant atteindre des petits espaces.*

Optionnel : pince à bec pointu

Cette pince ressemble à la pince à bec long, mais elle a des mâchoires plus fines et précises qui se terminent en pointe. Je l'utilise beaucoup pour accéder aux petits composants placés sur une plaque de montage. Le meilleur endroit pour trouver de telles pinces est dans un magasin ou un site web spécialisé en loisirs créatifs. Assurez-vous que la partie interne des mâchoires soit plate, comme le montre la figure 6-5. Vous ne devez pas choisir une pince aux mâchoires arrondies permettant de créer des boucles de fil de joaillerie.

Figure 6-5. *Pince à bec pointu permettant un travail de précision à petite échelle.*

Essentiel : pince à dénuder

Le type de fil que vous allez utiliser est muni d'une gaine isolante en plastique. Lorsque vous devez retirer partiellement cet isolant, une *pince à dénuder* telle que celle de la figure 6-6 est l'outil le plus pratique pour le faire.

Certaines pinces à dénuder possèdent des poignées à angle droit ou courbées, d'autres ont des poignées droites. Personnellement, je pense que cela n'a aucune importance.

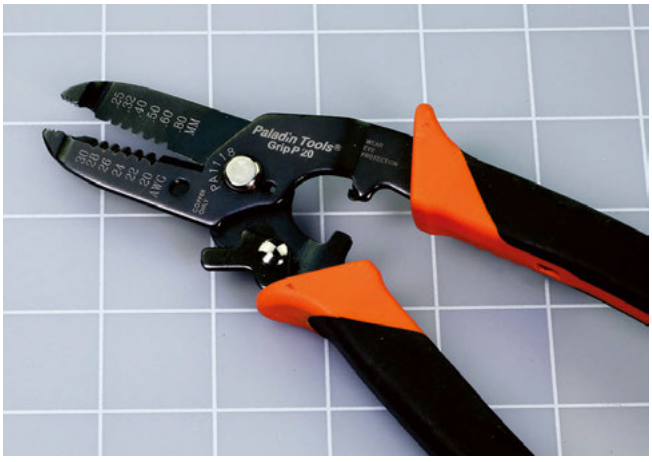


Figure 6-6. *Pince à dénuder permettant de retirer l'isolant d'un fil.*

Vous devez vérifier que la pince que vous achetez est capable de dénuder les fils que vous allez utiliser. Vérifiez sur les mâchoires de la pince, qu'elle peut dénuder les fils de jauge 22 (diamètre 0,65 mm). La plage de diamètres peut couvrir les jauges 14 à 24 ou 24 à 30 (0,51 à 1,63 mm ou 0,26 à 0,81 mm). Les numéros de jauge sont expliqués à la suite.

Vous pourrez trouver des *pinces à dénuder automatiques*, notamment en ligne. En maintenant le fil qu'elles dénudent, ces pinces sont étudiées pour permettre l'opération d'une seule main. Je les ai utilisées pendant quelque temps, mais j'ai trouvé qu'elles manquaient de précision et ne fonctionnaient pas très bien.

Les plus machos prétendront qu'ils n'ont pas besoin d'outil pour cette opération. Mes deux dents de devant ébréchées témoignent que c'est vraiment une mauvaise approche. Voir la figure 6-7.

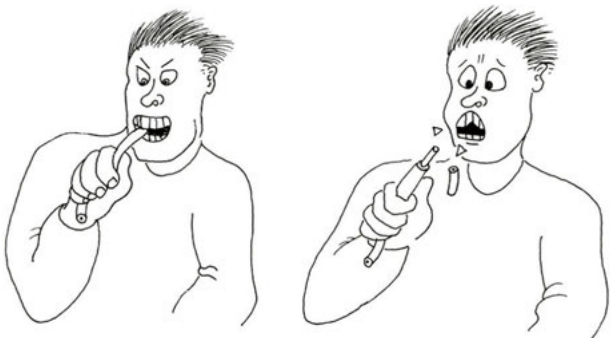


Figure 6-7. *Trop pressé ? Vous ne trouvez pas votre pince à dénuder ? Résistez à la tentation, cela pourrait bien vous arriver !*

Essentiel : plaque d'essais

Pour les besoins de l'électronique, une plaque d'essais est un petit support en plastique percé de trous espacés de 2,54 mm. À l'intérieur de la plaque se trouvent des petits contacts à ressorts qui permettent d'établir des connexions entre les fils et les composants que l'on insère dans les trous. Cela permet la réalisation de circuits plus rapidement qu'en utilisant des fils de tests équipés de pinces crocodiles comme dans le chapitre I.

Vous pourrez trouver ces plaques sous les appellations *plaques de prototypage*, *plaques de montage* ou *plaques d'essais sans soudure*. Ces différents noms désignent la même chose.

La figure 6-8 montre une *mini plaque d'essais*. Certaines sont vendues comme « compatibles Arduino », mais elles ne comportent pas suffisamment de trous pour l'usage que nous allons en faire, n'achetez pas ce type de plaque.

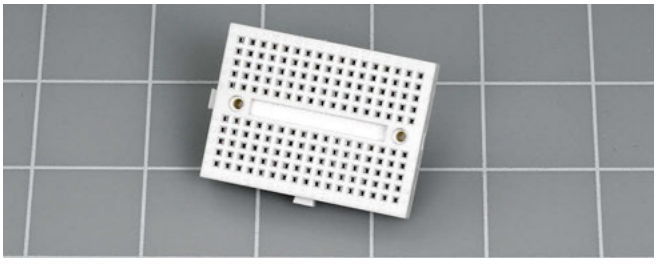


Figure 6-8. *Une plaque d'essais miniature n'est pas suffisamment grande pour les projets de ce livre.*

Une *plaque de montage avec bus d'alimentation* est illustrée figure 6-9. Le terme bus se réfère à chaque rangée de trous parallèle au bord le plus long de la plaque. Je les ai entourées sur la figure.

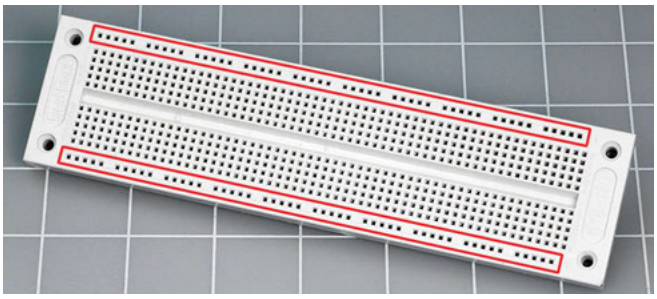


Figure 6-9. *Plaque d'essais à bus simple. Chaque bus est entouré de rouge.*

La figure 6-10 montre une *plaque de montage à bus double*. Elle possède deux rangées de trous de chaque côté de l'axe le plus long de la plaque. Ce sont les bus doubles. Les traits rouges et bleus imprimés sur la plaque servent de guide.

Dans la première édition de *L'électronique en pratique*, j'utilisais des plaques à double bus car leur constitution limite le nombre de fils reliant les composants. Cependant, certains lecteurs ont fait des erreurs de câblage car ils confondaient les deux bus. Dans la seconde édition de ce livre, j'ai modifié tous les circuits pour les adapter à des plaques à bus unique, ce qui convenait bien, cependant les plaques à bus unique deviennent rares et difficiles à trouver. Dans cette troisième édition, j'ai donc dû me résoudre à revenir en arrière et utiliser des plaques à double bus.

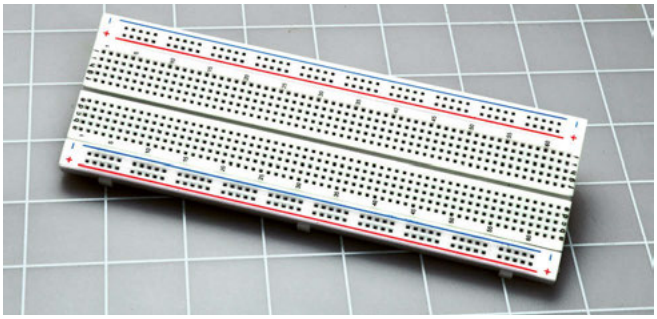


Figure 6-10. *Plaque de prototypage à bus double que j'utilise dans ce livre.*

La figure 6-10 montre la plaque dont vous aurez besoin. Le fabricant n'est pas important, le plus important est qu'elle comporte au minimum 800 trous (souvent nommés *trous de contacts*).

J'ai coutume de dire que vous n'avez réellement besoin que d'une seule plaque d'essais car elles sont réutilisables. Leur prix a tellement diminué que vous pouvez vous en procurer deux ou trois. Cela vous permettra de réaliser de nouveaux circuits prototypes sans démonter les précédents.

Essentiel : fil de câblage

Vous aurez besoin de fil de câblage pour réaliser les connexions sur une plaque d'essais. On le trouve en bobines de différentes longueurs comme sur la figure 6-11, ou parfois en vrac.

Figure 6-11. *Bobines de fil de câblage disponibles en 5, 10, ou 50 mètres.*

Quand l'isolant est retiré, il s'agit d'un fil monobrin comme celui de la figure 6-12. Comparez-le avec celui de la figure 6-12 qui est du fil multibrin plus flexible que le précédent, mais si vous essayez de l'insérer dans le trou d'une plaque d'essais, il n'entrera pas correctement et ce sera frustrant. Vous devez impérativement utiliser du fil monobrin pour les plaques d'essais.

La *jauge américaine* pour les fils (souvent abrégée *AWG* pour *American Wire Gauge*) est un nombre caractérisant le diamètre du fil conducteur. Plus le nombre est élevé, plus le fil est fin. Si vous voulez convertir la jauge en unités métriques, vous trouverez facilement des tables ou applications de conversion en ligne. Faites une recherche Google avec l'argument « `conversion de jauge américaine` ».

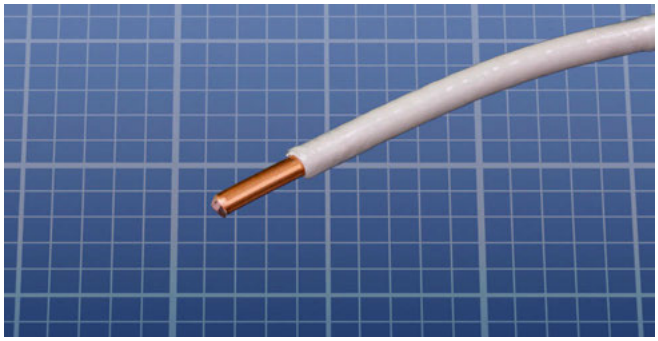


Figure 6-12. *Le fil de câblage monobrin est constitué d'un seul conducteur enrobé d'une gaine isolante.*

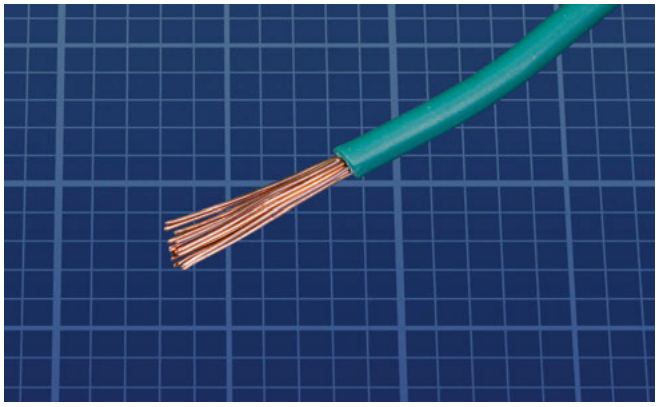


Figure 6-13. *Par rapport au fil monobrin, le fil multibrin présente l'avantage d'être plus souple.*

Pour les projets de ce livre, la section optimale du fil utilisé correspond à la jauge 22 soit un diamètre du fil métallique de 0,65 mm. Dans les précédentes éditions de ce livre, je préconisais d'utiliser du fil de jauge 20 (plus gros) car les connexions avec une plaque de montage étaient meilleures. J'ai découvert des plaques d'essais qui avaient des ressorts de contact plus serrés ce qui les rendaient plus difficiles à utiliser avec un fil plus gros. C'est pourquoi, le fil de jauge 22 est un meilleur compromis.

Certains fils de cuivre ont un plaquage de couleur argentée visible quand on les dénude. Ce type de fil est dit *étamé*. Pour les projets de ce livre, vous pouvez utiliser du fil de cuivre nu ou du fil étamé.

Je vous suggère de vous procurer quatre bobines de 10 mètres, de fils de couleur rouge, bleu, vert et jaune. Les différentes couleurs sont utiles pour identifier les connexions dans un circuit. J'utilise les fils rouge et bleu respectivement pour le pôle positif et le pôle négatif de l'alimentation de tous les circuits de ce livre, le jaune et le vert étant utilisé pour les connexions intermédiaires. Le fil de couleur noire est parfois plus facile à trouver que le bleu, vous pouvez utiliser indifféremment l'un ou l'autre type.

Optionnel : fil multibrin

Lorsque vous finalisez un circuit dans un coffret, du fil multibrin convient parfaitement pour faire les liaisons entre les interrupteurs et le circuit, car il est plus souple. Si vous décidez d'acheter du fil souple, je vous suggère du fil de jauge 22 (diamètre 0,65 mm). Si vous utilisez une autre couleur que rouge, bleu, vert ou jaune, cela vous permettra de les différencier des autres fils monobrins, vous pouvez par exemple choisir du fil noir.

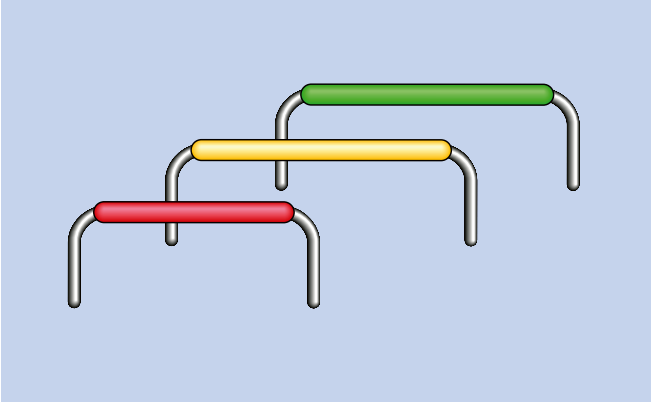


Figure 6-14. *Fils de pontage ou cavaliers, pour faire les liaisons sur les plaques d'essais.*

Optionnel : fil de pontage ou cavalier

Si vous dénudez un morceau de fil d'environ 1 cm à chaque extrémité, et que vous insérez ces extrémités dans une plaque d'essais après les avoir pliées, vous avez formé un *cavalier* ressemblant à ceux de la figure 6-14. Une connexion est ainsi créée en réalisant un pont au-dessus de rangées de trous, et si vous le coupez à la bonne longueur, vous obtiendrez un circuit propre où les erreurs seront faciles à trouver.

Dénuder le fil et le plier à angle droit ne devrait pas vous prendre beaucoup de temps, mais certaines personnes sont impatientes, en ce cas, vous pouvez acheter un assortiment de fils de pontage prédécoupés comme ceux de la figure 6-15.

J'ai longtemps utilisé des fils prédécoupés, mais j'ai arrêté car les couleurs de l'isolant de ces fils identifient la *longueur* du pontage alors que dans mes circuits, je souhaite que la couleur identifie la *fonction* du cavalier. Je veux, par exemple, que les fils rouges soient reliés au pôle positif de la source d'alimentation, quelle que soit la longueur de la liaison.

Vous pouvez utiliser des fils prédécoupés si vous le souhaitez, mais en plus d'induire des confusions par leurs couleurs, ils sont plus onéreux.

Examinons les fils flexibles munis de petites fiches en épingles à leurs extrémités, comme ceux de la figure 6-16. C'est une des premières choses que vous trouverez si vous recherchez des fils de pontage sur Internet. Étant flexibles, ils n'ont pas à être coupés à une dimension précise et ils peuvent relier des trous éloignés de 2,54 à 80 mm. Une seule taille permet de couvrir tous les besoins. C'est une option qui paraît judicieuse.

Malheureusement, ce type de fil convient tant que vous ne faites pas d'erreurs de câblage, et en réalité, tout le monde fait des erreurs de câblage. Le temps que vous aurez gagné en créant rapidement des connexions sera perdu quand vous devrez vous battre pour trouver la mauvaise liaison, au milieu de l'enchevêtrement de vos fils.

La figure 6-17 vous montre un circuit réalisé sur une paire de plaques d'essais en utilisant des fils de pontage souples. La figure 6-18 montre le même circuit réalisé en utilisant des fils de pontage préparés manuellement.

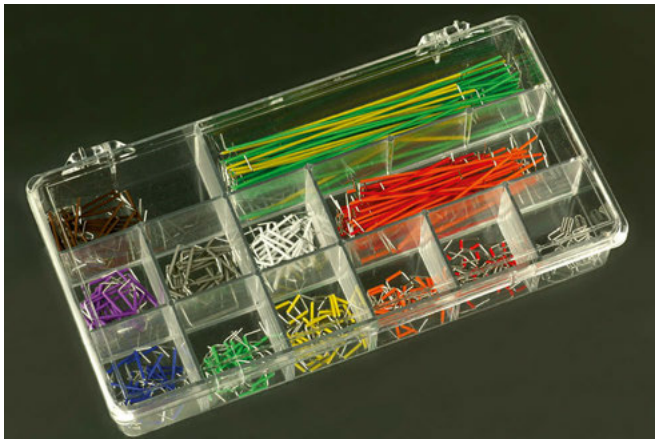


Figure 6-15. *Assortiment de cavaliers prédécoupés.*

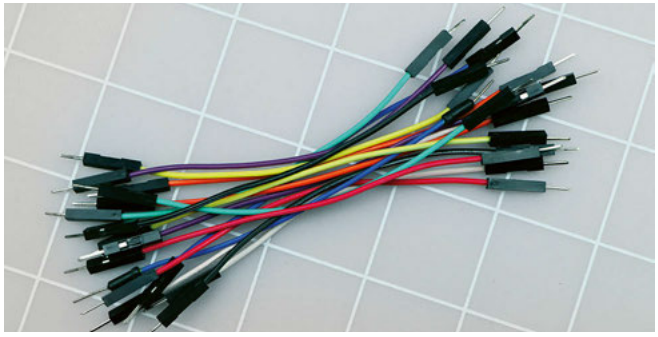


Figure 6-16. *Fils de pontage flexibles munis de petites fiches à leurs extrémités.*

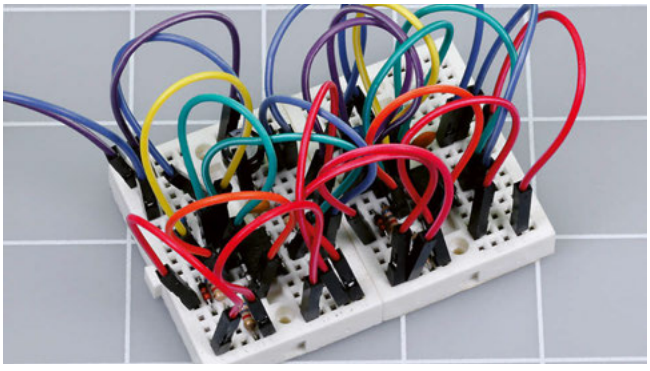


Figure 6-17. *Circuit réalisé sur deux plaques d'essais miniatures à l'aide de fils de pontage souples.*

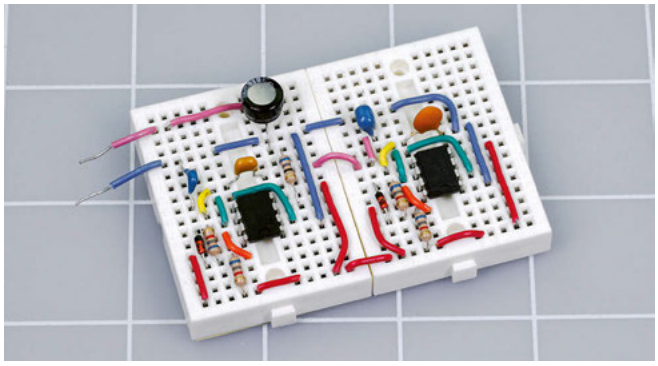


Figure 6-18. *Circuit identique à celui de la figure 6-17 réalisé avec des fils de pontage préparés manuellement.*

Avec quel circuit préféreriez-vous travailler pour rechercher une erreur ?

Si, par hasard, votre circuit ne fonctionne pas et que vous me demandez d'où vient l'erreur en m'envoyant une photo, je pourrais vous aider si vous utilisez des petits cavaliers, mais probablement pas si vous utilisez des fils de pontage flexibles.

Si je ne vous ai pas convaincu de la nécessité d'utiliser des fils de pontage préparés manuellement et à la bonne longueur, rappelez-vous que les fiches des fils flexibles sont parfois défectueuses et peuvent provoquer des mauvaises connexions, même si elles paraissent être en bon état. Cela peut rendre la recherche des erreurs déroutante. Les fiches ont également tendance à se casser après un temps d'utilisation plus ou moins long.

Si vous insistez pour utiliser des fils de pontage flexibles, je vous recommande de vous procurer la variété « premium » vendue par `adafruit.com` qui semble avoir des fiches de connexions plus fiables.

Essentiel : interrupteur à glissière

Il existe des dizaines d'interrupteurs de types différents, mais pour les expériences de ce livre, vous aurez besoin d'*interrupteurs à glissière.* Dans l'expérience 6, il sera utile de disposer de deux interrupteurs comme ceux de la figure 6-19, avec des broches espacées de 5,08 mm, qui pourront être facilement reliées à l'aide des pinces crocodiles des fils de tests.

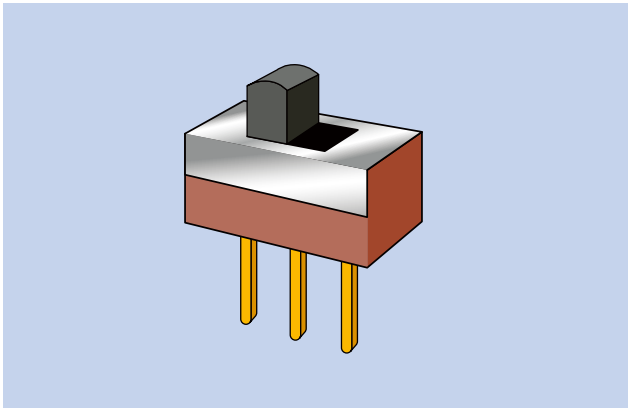


Figure 6-19. *Interrupteur à glissière avec les broches espacées de 5,08 mm.*

Pour toutes les autres expériences du livre, vous aurez besoin d'interrupteurs à glissière avec des broches espacées de 2,54 mm qui pourront être insérées sur une plaque d'essais. Ce type d'interrupteur est illustré sur la figure 6-20.

Si vous avez des difficultés à trouver le gros interrupteur à glissière, le plus petit peut être connecté avec des pinces crocodiles si vous pliez préalablement ses broches vers l'extérieur (voir la figure 6-30).

Les expériences de ce livre manipulant des courants de faibles intensités, il n'est pas nécessaire que vous achetiez des interrupteurs robustes ou couteux.

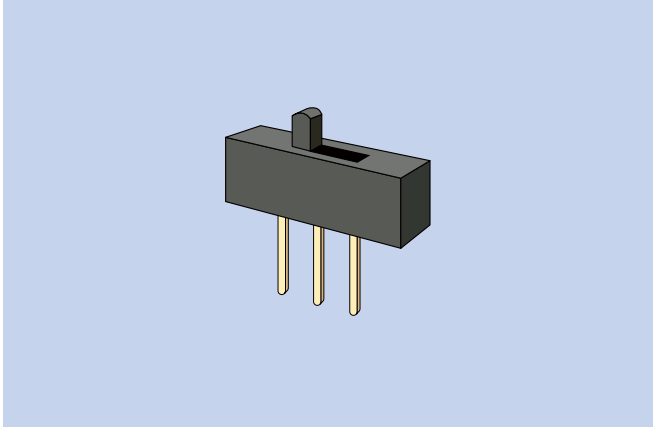


Figure 6-20. *Interrupteur à glissière en plastique avec broches espacées de 2,54 mm.*

Essentiel : interrupteur tactile

Ce composant ressemble à un petit bouton-poussoir, et il fonctionne de façon identique, bien qu'il soit appelé *interrupteur tactile*. Si vous l'insérez dans une plaque d'essais, il vous permet de déclencher un circuit par la simple pression de votre doigt. La figure 6-21 montre quatre types usuels d'interrupteurs tactiles.

Le type A est celui que je préfère car il possède des broches arrondies qui s'insèrent facilement dans une plaque de montage. Malheureusement, ce modèle est moins répandu que les autres.

Le type B est acceptable, mais ses broches sont habituellement espacées de 6,5 mm. C'est presque, mais pas totalement, approprié pour être utilisé avec une plaque de montage. Vous pouvez néanmoins lui permettre de s'insérer dans une plaque en aplatissant ses broches avec une pince plate, puis en les pliant pour qu'elles soient espacées de 5,08 mm. Ainsi préparés, les interrupteurs que j'ai expérimentés s'insèrent correctement dans les trous d'une plaque.

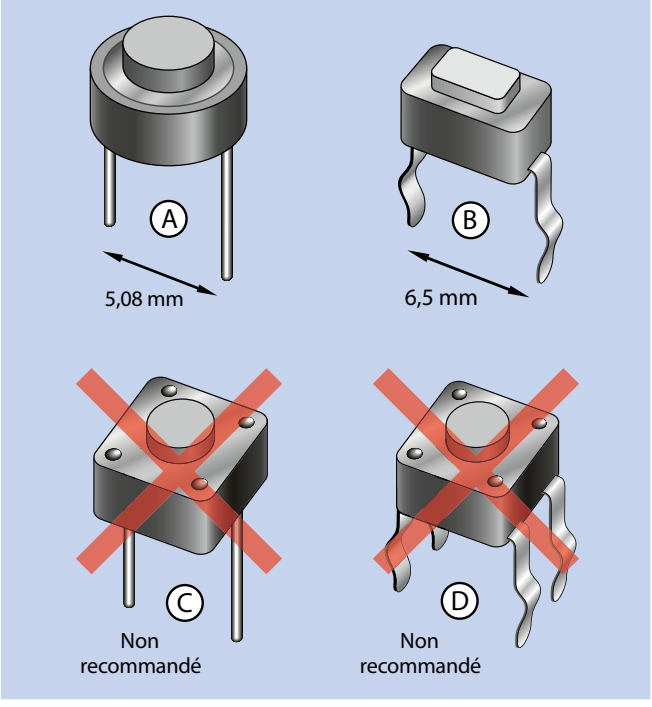


Figure 6-21. *Quatre types d'interrupteurs tactiles.*

Le type C est acceptable, ses broches sont espacées de 5,08 mm mais les plaques d'essais ne laissent pas suffisamment de place pour contenir la base carrée de cet interrupteur.

Le type D est le plus commun, mais ses quatre petites pattes ne s'insèrent pas facilement dans une plaque de prototypage dont elles sont souvent éjectées. De plus, leur corps carré est légèrement trop important et leurs quatre broches ne conviennent pas à mes montages.

Leurs références et points de vente sont listés dans les annexes A et B avec les autres composants.

Essentiel : relais

Un *relais* contient un interrupteur qui est activé par un contrôle électrique distant. Le brochage n'est pas standardisé, il dépend du fabricant, c'est pourquoi vous devez être prudent en achetant ces composants. La figure 6-22 montre le relais `Omron G5V-H1-DC9` que je recommande, mais si vous souhaitez utiliser un relais différent, consultez l'annexe A.

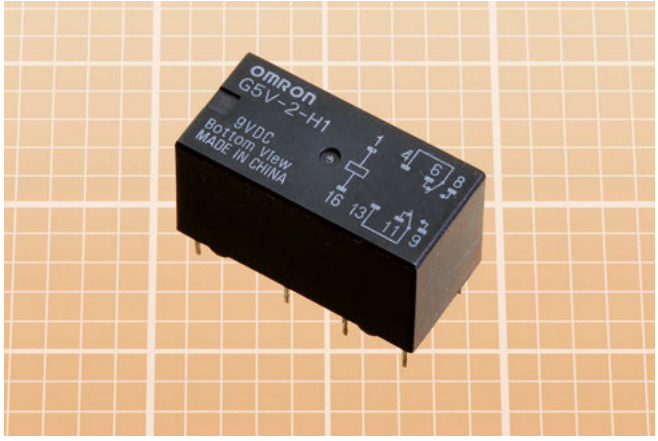


Figure 6-22. *Relais recommandé pour les projets de ce livre.*

Essentiel : potentiomètre ajustable

Un *potentiomètre* possède trois connexions, la résistance entre les broches varie quand vous tournez un bouton ou un axe. Un *potentiomètre ajustable*, également appelé *résistance réglable* est un potentiomètre miniature pouvant être inséré

sur une plaque d'essais. La figure 6-23 en montre deux modèles prévus pour être réglés en utilisant un tournevis miniature. J'en utiliserai deux de différentes valeurs que vous trouverez dans la liste des composants de l'annexe A.

Les circuits de ce livre nécessitent des potentiomètres ajustables avec un boîtier de base carrée inférieure à 8 mm de côté. Des potentiomètres plus gros ne pourront pas se loger dans la place disponible. Comme beaucoup de composants, les résistances réglables n'ont pas un brochage normalisé. L'annexe A vous guidera pour vous procurer le vôtre.

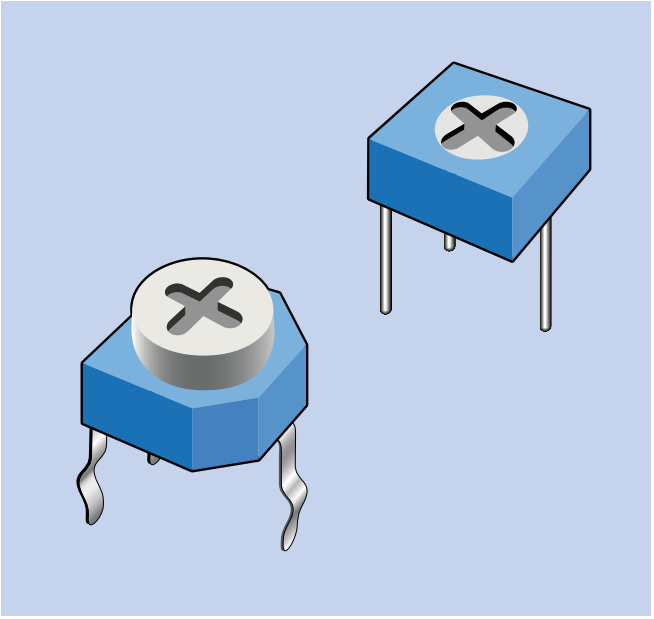


Figure 6-23. *Potentiomètres ajustables.*

Essentiel : transistor

Un seul modèle de transistor est utilisé dans ce livre. Sa référence est **2N3904**, n'importe quel fabricant conviendra. Un exemple de ce transistor est illustré sur la figure 6-24.

Dans l'édition précédente de *L'électronique en pratique*, j'utilisais des transistors **2N2222**. Ils sont plus courants que le **2N3904** et tolèrent une puissance supérieure, mais Motorola a décidé de fabriquer sa propre version avec les broches inversées ce qui amenait à des confusions. C'est pourquoi je n'utilise plus le **2N2222**.

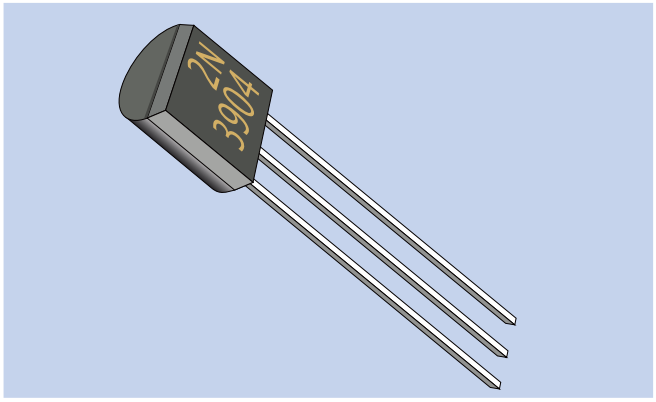


Figure 6-24. *Transistor 2N3904.*

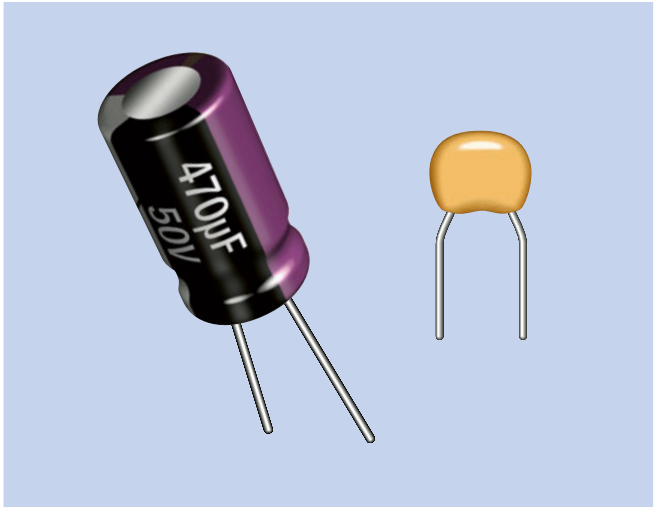


Figure 6-25. *À gauche un condensateur électrochimique et un condensateur en céramique à droite.*

Essentiel : condensateur

Les *condensateurs* ne sont pas aussi peu couteux que les résistances, mais ils sont suffisamment peu onéreux pour que vous puissiez considérer en acheter un assortiment plutôt que des valeurs uniques. Vous trouverez des informations pour les acheter dans l'annexe A.

Pour les petites valeurs, des condensateurs en *céramique* sont recommandés. Ils sont encapsulés dans une goutte

de céramique. Pour les plus fortes valeurs, les condensateurs *électrochimiques* sont moins onéreux. Un exemple de chaque type est représenté sur la figure 6-25. Leurs couleurs peuvent varier, ce n'est pas important.

Vous trouverez des informations supplémentaires sur les condensateurs en page 97.

Essentiel : haut-parleur

Les expériences de ce livre nécessiteront un *haut-parleur* d'au moins 25 mm de diamètre, un modèle de 50 mm procurera un son de meilleure qualité. Un haut-parleur de 75 mm reproduira plus agréablement les sons des fréquences basses, mais les basses ont tendance à utiliser une puissance plus importante.

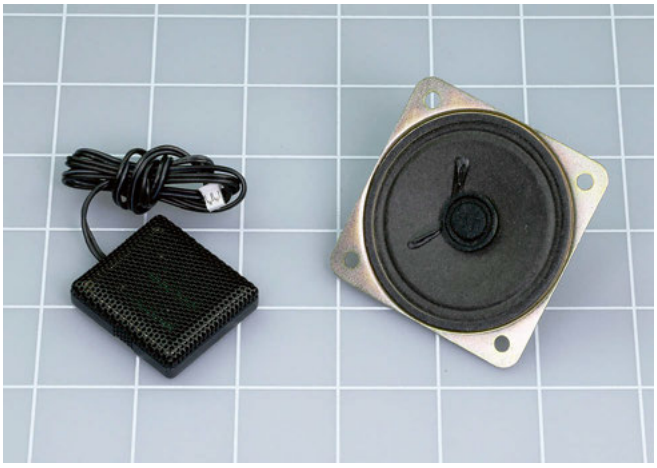


Figure 6-26. *Deux haut-parleurs, l'un de diamètre 30 mm, l'autre de diamètre 50 mm.*

Nous ne diffuserons pas de son haute-fidélité, il n'est donc pas nécessaire que vous dépensiez beaucoup pour acheter cet élément. La figure 6-26 montre un couple de haut-parleurs. Je vous suggère d'utiliser un modèle de diamètre 50 mm, le moins onéreux que vous trouverez, mais d'impédance 8 ohms.

Essentiel : résistances

Vous aurez besoin de résistances pour presque tous les projets de ce livre. Si vous n'avez pas encore acheté un assortiment de résistances pour le chapitre 1, merci de consulter les tableaux de l'annexe A pour connaitre ce dont vous avez besoin.

Et quoi d'autre ?

Vous pensez peut-être que j'ai préconisé un bon nombre d'outils et composants. Soyez assuré que presque tous les éléments que j'ai décrits seront réutilisables tout au long de cet ouvrage. Je vous suggérerai quelques éléments additionnels au début de chaque chapitre, et vous aurez également besoin de quelques circuits intégrés, mais ils ne sont pas très couteux.

Expérience 6
Connectons-nous

Le concept de l'interrupteur semble assez simple. D'ailleurs, votre logement en est rempli. Vous avez les interrupteurs des éclairages sur vos murs, des interrupteurs de puissance sur vos appareils ; mais les interrupteurs deviennent plus intéressants quand ils possèdent de multiples positions ou quand deux, ou plus, d'entre eux sont reliés.

Vous aurez besoin de :

- 1 multimètre
- 1 pile de 9 V
- 2 interrupteurs à glissière de type SPDT à trois bornes espacées de 5,08 mm (vous pouvez utiliser des interrupteurs plus petits si vous travaillez avec soin et précision)
- 5 fils de tests (1 rouge, 1 noir et 3 d'une autre couleur)
- 1 LED générique rouge
- 1 résistance de 470 ohms

Commutation très simple

La figure 6-27 montre l'interrupteur le plus basique, vendu aux écoles pour l'apprentissage de l'électricité. Il est plus connu sous le nom d'*interrupteur à lame*. Je ne vous recommande pas d'en acheter un, je vous le montre car il m'aide à vous expliquer la constitution de la plupart des interrupteurs.

Le pivot du levier est relié à la borne rouge, il s'agit du *pôle commun* de l'interrupteur. Quand vous manipulez le levier, vous le *basculez* Vous ne serez pas surpris si je vous dis qu'il s'agit d'un interrupteur *unipolaire bidirectionnel* (*Single-Pole Double-Throw* en anglais, soit SPDT, parfois 1P2T).

Les pinces métalliques à chaque extrémité de la base de l'interrupteur sont appelées *contacts*, et comme vous pouvez réaliser un contact avec l'un ou l'autre, cet interrupteur est dit *ON-ON*. La terminologie demeure identique pour les interrupteurs modernes.

Figure 6-27. *Interrupteur à lame commercialisé pour les besoins de l'enseignement. Dans un interrupteur moderne, les parties constitutives ont les mêmes noms et fonctions.*

Si vous aimez les films d'horreur, vous avez probablement déjà vu un savant fou utilisant un interrupteur à lame dans sa cave comme sur la figure 6-28.

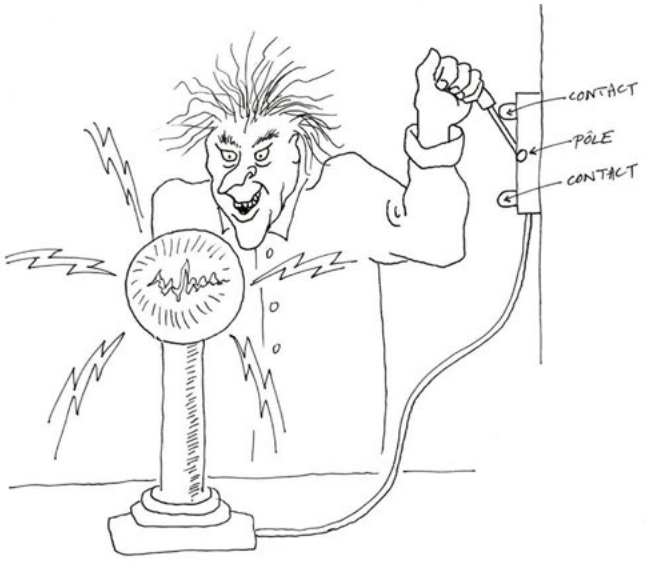


Figure 6-28. *Ce savant fou a équipé son laboratoire d'un interrupteur unipolaire bidirectionnel.*

Les interrupteurs de la figure 6-19 et 6-20 sont plus petits, moins onéreux et plus pratiques. Ce sont des interrupteurs à glissière car vous les utilisez en faisant glisser un petit bouton situé au-dessus, qui est connu sous le nom de *levier de commande*. Il réalise une connexion à l'intérieur de l'interrupteur à l'aide d'éléments comparables à ceux de la figure 6-29.

Chacun des interrupteurs à glissière que vous allez utiliser dans cette expérience possède trois broches. Si vous pensez que ces broches ont un rôle identique à celui des trois bornes de l'interrupteur à lame de la figure 6-27, vous avez raison. Je vous demanderai de le vérifier dans quelques instants.

Ces dernières années, les dimensions des interrupteurs à glissière ont notablement diminué. C'est pratique quand vous souhaitez implanter un circuit dans un espace réduit, mais si vous tentez de relier des pinces crocodiles aux bornes d'un interrupteur, ce n'est pas aussi facile. Pour cette expérience qui utilise des fils de tests, il sera préférable d'employer des interrupteurs ayant des broches espacées de 5,08 mm.

Quand vous achèterez vos composants, vous aurez peut-être des difficultés à en trouver de suffisamment gros, mais si vous êtes patient, et avez des mains agiles, vous pouvez utiliser celui de la figure 6-20 dont les broches ne sont espacées que de 2,54 mm. Pliez légèrement les bornes vers l'extérieur pour laisser assez de place à vos fils de test, comme sur la figure 6-30.

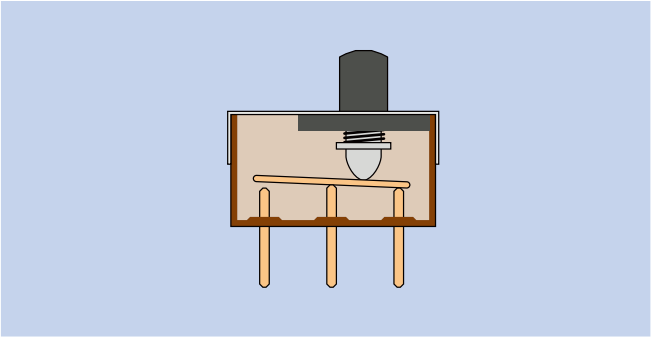


Figure 6-29. *Éléments internes d'un interrupteur à glissière.*

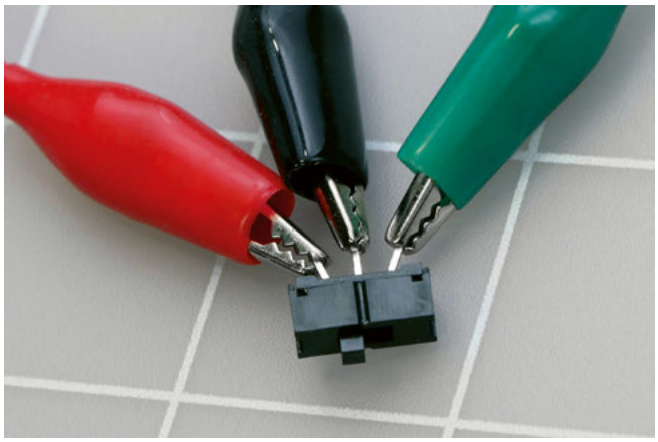


Figure 6-30. *Pliez les bornes d'un petit interrupteur vers l'extérieur afin de pouvoir y relier les pinces crocodiles de vos fils de test.*

Test de continuité

Réglez votre multimètre pour le test de continuité en tournant son sélecteur vers le symbole que vous pouvez voir sur les figures 6-31 et 6-32. Mettez en contact les deux pointes de touche, vous devriez entendre le bip de votre appareil. Vous vérifiez ainsi que le circuit est continu, cela s'appelle un *test de continuité.* Si vous avez des problèmes d'audition, vous pouvez également voir l'affichage d'un message sur l'écran du multimètre.

Reliez maintenant une pince crocodile d'un fil de tests à chacune des pointes de touche de votre multimètre et les autres extrémités des fils aux bornes de l'interrupteur à glissière comme sur la figure 6-33. Déplacez le levier de commande de l'interrupteur d'un côté, puis de l'autre, vous entendrez votre multimètre bipper puis cesser. Si vous êtes de nature curieuse, vous vous demandez ce qui se passerait si vous ne vérifiiez que les deux broches externes de l'interrupteur, ce que vous pouvez bien entendu faire.

La figure 6-34 montre le *schéma* de la vérification de l'interrupteur où le symbole de l'interrupteur est assez ressemblant à ce qu'il est réellement à l'intérieur du composant.

Maintenant que vous avez vu combien cela est facile, je veux que vous fassiez quelque chose de plus intéressant. Connectez les interrupteurs ensemble selon la figure 6-36. Remarquez que dans le schéma, j'ai identifié

les interrupteurs A et B. Je pourrais avoir choisi des noms plus représentatifs, A et B sont plus souvent utilisés que des noms comme « Michel » ou « Sheila » quand on dessine des schémas. Les positions de chacun des interrupteurs sont identifiées par 1 et 2.

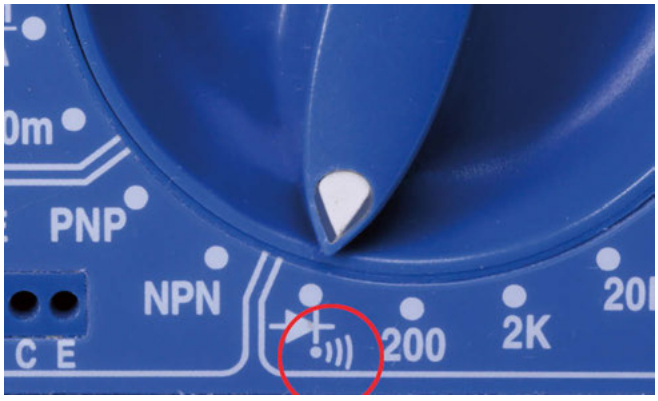


Figure 6-31. *Symbole du test de continuité d'un multimètre.*

Figure 6-32. *Symbole du test de continuité d'un autre multimètre.*

Combien de combinaisons différentes des positions d'interrupteur existent dans ce test ? L'interrupteur A en a deux et, pour chacune de ces positions, l'interrupteur B en possède également deux. Je suis certain que vous serez d'accord avec moi, `2 * 2 = 4`, le nombre total de combinaisons est quatre. Vous pouvez créer un tableau dans votre carnet de notes, comme sur la figure 6-37, montrant quelles combinaisons de vos interrupteurs font bipper votre multimètre. Ce tableau peut paraitre trop évident pour être utile, mais vous verrez de nombreux autres tableaux de ce type quand nous aborderons la logique numérique par la suite dans ce livre. C'est pourquoi je tiens à en introduire le principe ici.

Les interrupteurs de la figure 6-36 sont reliés en *série*, ce qui signifie que le courant électrique doit traverser le premier avant d'atteindre l'autre, et il n'y a qu'une seule combinaison qui déclenche le bip. Je les ai colorées dans le tableau.

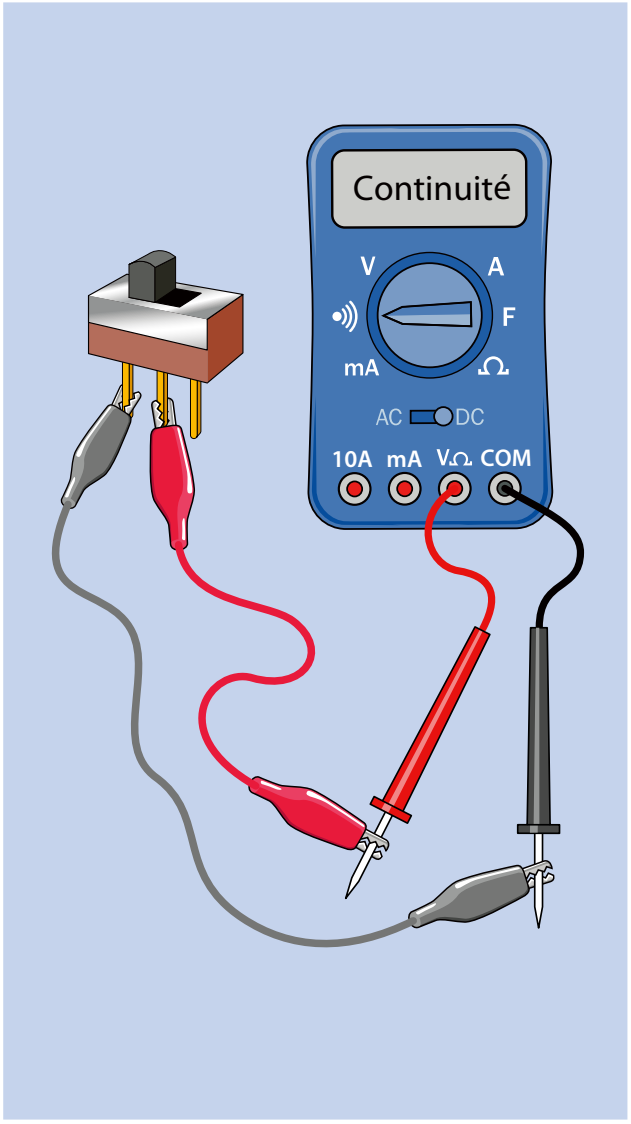


Figure 6-33. *Découverte d'un interrupteur à glissière.*

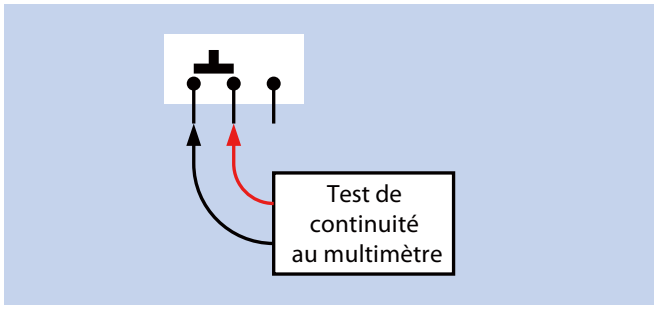


Figure 6-34. *Schéma du circuit de la figure 6-33.*

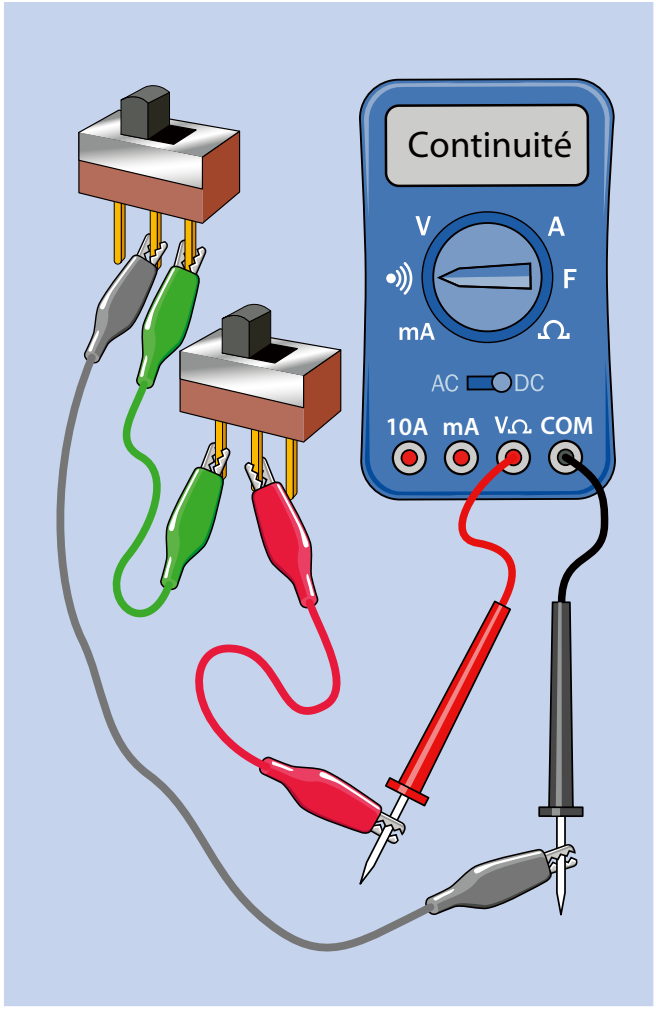


Figure 6-35. *Ajout d'un interrupteur en série.*

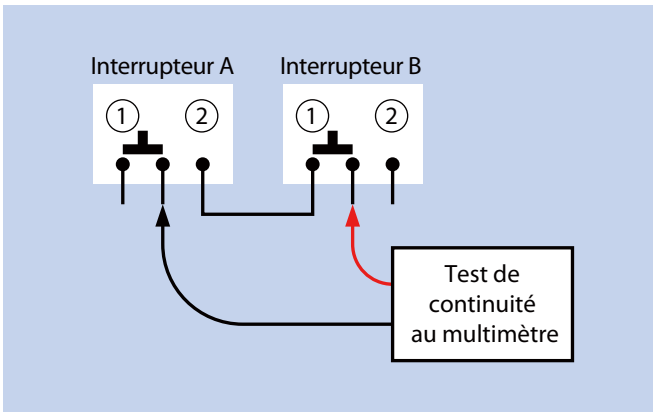


Figure 6-36. *Schéma du circuit de la figure 6-35.*

Interrupteurs reliés en série		
Interrupteur A	**Interrupteur B**	**Continuité**
Position 1	Position 1	●
Position 1	Position 2	●
Position 2	Position 1	●
Position 2	Position 2	●

Figure 6-37. *Tableau indiquant les combinaisons et la continuité.*

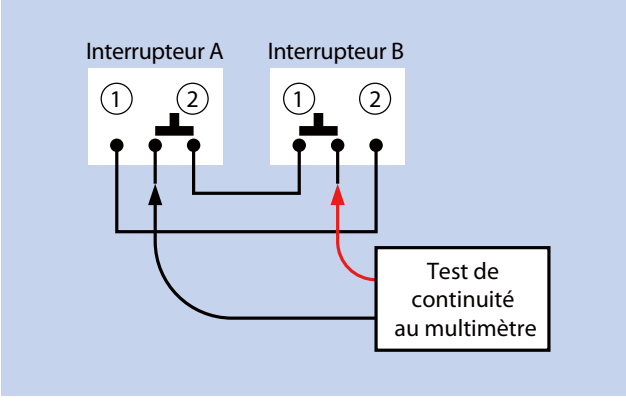


Figure 6-38. *Circuit série-parallèle.*

Interrupteurs reliés en série parallèle		
Interrupteur A	**Interrupteur B**	**Continuité**
Position 1	Position 1	●
Position 1	Position 2	●
Position 2	Position 1	●
Position 2	Position 2	●

Figure 6-39. *Tableau de continuité du circuit de la figure 6-38.*

Ajoutez maintenant un fil de test supplémentaire afin que le circuit soit semblable à celui de la figure 6-38. Je pense que vous pouvez le faire sans que je vous montre une autre vue du circuit. Je l'appelle circuit série-parallèle car il y a maintenant deux liaisons en série, mais elles sont reliées par des fils qui sont en parallèle. Si vous créez un nouveau tableau, comme sur la figure 6-39, vous verrez que A-1 et B-2 font bipper votre multimètre, A-2 et B-1 également, alors que les autres combinaisons ne provoquent rien.

C'est intéressant ; si le multimètre ne retentit pas, il suffit de déplacer le levier d'un des interrupteurs pour le faire bipper. De même, s'il émet un bip, en déplaçant le levier de commande d'un des interrupteurs il cessera. Ce circuit trouve son application pour l'éclairage de votre logement comme je l'explique par la suite. Vous pouvez sans doute deviner de ce dont je veux parler.

Commutation à va-et-vient

Dans les schémas, jusqu'à présent, j'ai utilisé un symbole représentant spécifiquement un interrupteur à glissière. Un autre symbole pouvant représenter n'importe quel type d'interrupteur existe, c'est un symbole universel. (Combien existe-t-il d'interrupteurs différents ? Des centaines ! Faites une recherche en ligne des images d'interrupteurs pour vous en rendre compte.)

Le symbole universel d'un interrupteur est plus courant que celui de l'interrupteur à glissière Je l'ai utilisé dans le schéma de la figure 6-40 dans un circuit identique à celui de la figure 6-38. Le fonctionnement du circuit reste identique, car les connexions sont les mêmes. Les deux fils horizontaux sont en parallèle, mais le courant provenant du multimètre traverse les interrupteurs en série.

Si votre logement comporte un escalier, il y a probablement un éclairage câblé de cette façon. Vous utilisez un interrupteur en bas de l'escalier pour allumer l'éclairage s'il est éteint, ou l'éteindre s'il est allumé ; et vous pouvez utiliser l'interrupteur en haut de l'escalier de la même façon. La figure 6-41 montre ce que je dis. Un électricien dirait que vous avez un circuit *va-et-vient*, chaque interrupteur possède trois bornes. Vous avez vu qu'il existait quatre combinaisons des positions des interrupteurs, mais quand j'ai voulu discuter de cela avec un électricien, il n'était guère intéressé.

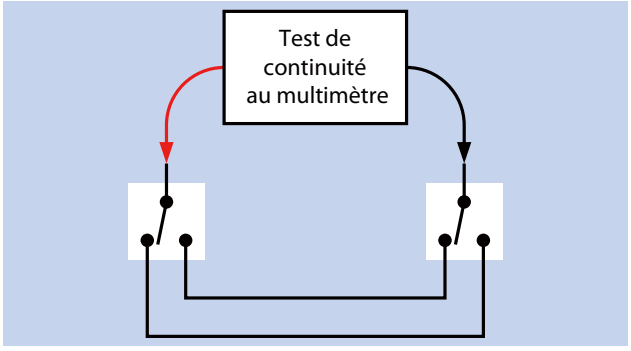


Figure 6-40. *Le symbole universel d'un interrupteur unipolaire bidirectionnel est utilisé dans cette version du schéma du circuit de la figure 6-38.*

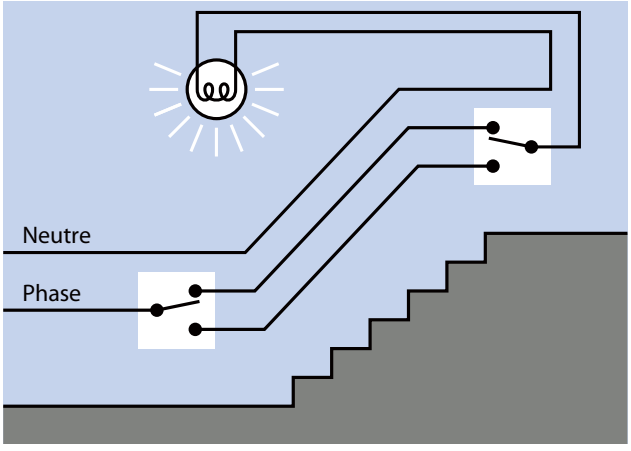


Figure 6-41. *Circuit va-et-vient dans une habitation.*

Si vous voulez voir une version miniature d'un circuit va-et-vient d'un logement, vous pouvez modifier le circuit de la figure 6-40 en remplaçant le multimètre par une LED munie d'une résistance de charge et une pile, comme le montre la figure 6-42.

Afin de vous montrer que je réalise les circuits que je décris, ma version de ce circuit est représentée sur la figure 6-43.

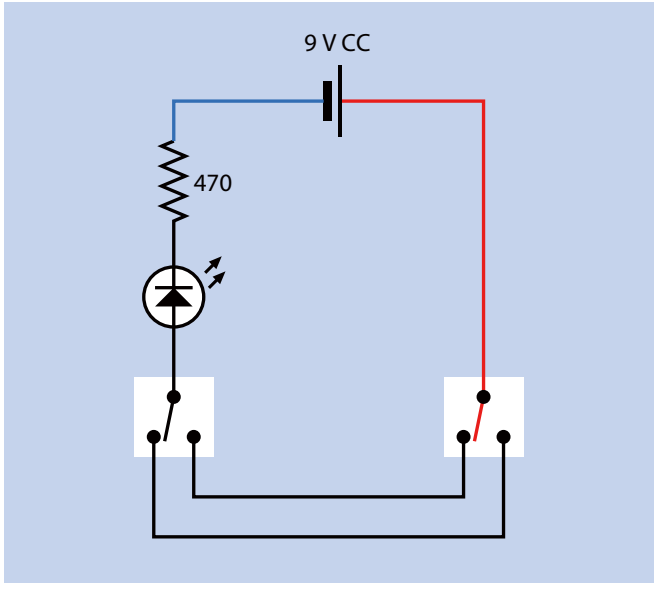


Figure 6-42. *Démonstration d'un circuit va-et-vient à basse tension.*

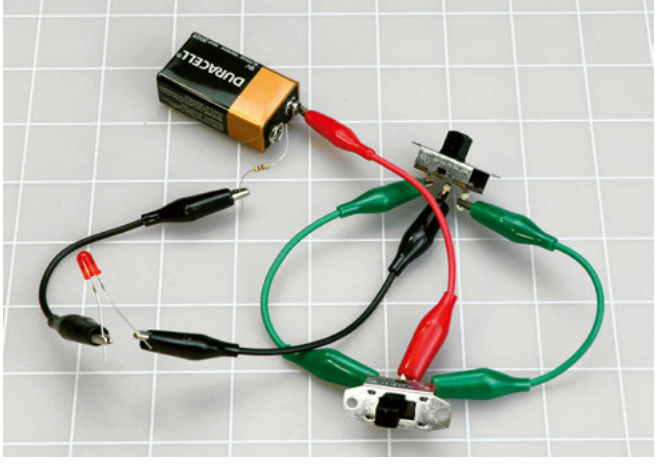


Figure 6-43. *Réalisation du circuit de la figure 6-42.*

Autres informations sur les interrupteurs

Parfois, vous n'avez besoin que d'un seul *interrupteur unipolaire unidirectionnel* (abrégé par SPST ou 1P1T). Un interrupteur on-off en est un exemple usuel. Une seule position réalise une connexion. La figure 6-44 montre son symbole schématique selon différents styles, tous identifiant le même composant. Dans ce livre, j'ai ajouté un rectangle blanc autour de chaque interrupteur, pour une meilleure clarté.

Des symboles similaires sont utilisés pour représenter les interrupteurs SPDT.

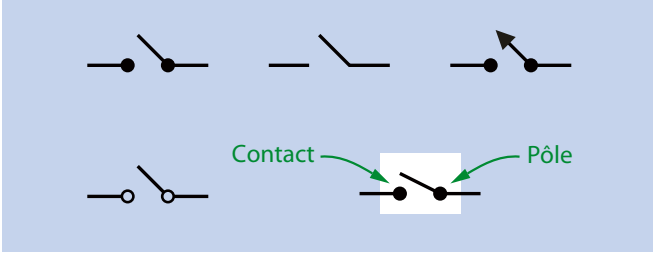


Figure 6-44. *Différents styles de symboles représentant un interrupteur SPST en schématique.*

Certains interrupteurs possèdent deux pôles totalement séparés, actionnés par un seul levier de commande, vous pouvez ainsi réaliser deux liaisons simultanément. Ils sont appelés *bipolaires*, abrégés par DP (ou parfois 2P). Un interrupteur bipolaire peut être à simple ou double position, selon l'usage que vous en faites. La figure 6-45 montre deux symboles d'interrupteurs DPDT. La ligne en pointillés joignant chaque symbole indique qu'en actionnant l'interrupteur, les deux contacts sont actionnés simultanément, même s'ils ne sont pas reliés électriquement.

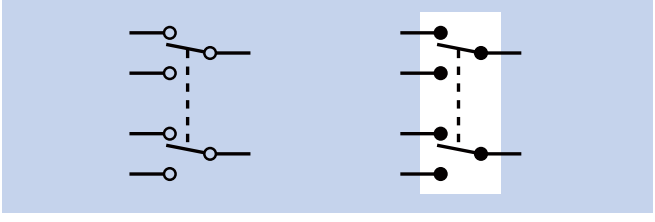


Figure 6-45. *Symboles représentant un interrupteur DPDT.*

Pourquoi vouloir deux pôles ? Supposons que vous avez un système stéréophonique et que vous souhaitiez pouvoir relier ses sorties à deux haut-parleurs de votre salon ou à ceux de votre salle à manger. Vous ne voulez évidemment qu'un seul interrupteur pour cela, mais les deux canaux audio-phoniques ont des sorties séparées. Vous allez donc utiliser un interrupteur DPDT dont les bornes communes seront reliées aux sorties de votre système stéréophonique.

Le tableau de la figure 6-46 résume le concept que je viens d'introduire. Les interrupteurs sont disponibles avec un, deux, trois ou davantage de pôles et chaque interrupteur peut réaliser un contact unique (unidirectionnel) ou deux contacts au choix (bidirectionnels).

Vous pensez peut-être qu'il n'y a plus beaucoup à apprendre au sujet des interrupteurs, mais ce n'est pas le cas. Certains interrupteurs sont munis d'un ressort de rappel à leur position de repos lorsque vous cessez de les actionner. Ils sont appelés *interrupteurs à action momentanée*, un simple bouton-poussoir en est un exemple. Vous imaginez sans doute qu'en enfonçant le poussoir, un contact s'établit à l'intérieur de l'interrupteur : c'est souvent le cas, on dit alors que le contact est *normalement ouvert*, abrégé par NO.

	Unipolaire	Bipolaire	Multipolaire
Unidirectionnel	SPST ou 1P1T	DPST ou 2P1T	3PST ou 3P1T
Bidirectionnel	SPDT ou 1P2T	DPDT ou 2P2T	3PDT ou 3P2T

Figure 6-46. *Différents types d'interrupteurs.*

Mais certains interrupteurs à action momentanée ouvrent leurs contacts quand vous appuyez sur leur bouton de ommande, ils sont alors nommés *normalement clos* (abrégé par NC).

Un interrupteur unipolaire unidirectionnel avec des contacts NO est parfois identifié par (ON)-OFF, les parenthèses indiquant l'état lorsque l'interrupteur est actionné. S'il possède des contacts NC, il s'agit d'un interrupteur ON-(OFF).

Vous trouverez des interrupteurs à action momentanée bidirectionnels. En d'autres termes, ils basculent entre deux positions « on » mais l'une d'entre elles est maintenue par le ressort de rappel. Ils seraient de type SPDT ON-(ON) à action momentanée.

Pour terminer, il existe des interrupteurs à double position dont le levier de commande possède une position centrale dont les contacts sont alors ouverts. Ils peuvent également être à action momentanée.

Vous n'allez utiliser aucun interrupteur spécial dans les expériences de ce livre, mais vous pourriez les rencontrer par la suite, c'est pourquoi je les présente pour mémoire.

	Action alternée	À action momentanée
Unidirectionnel	ON–OFF	Normalement clos ON–(OFF)
		Normalement ouvert (ON)–OFF
Bidirectionnel	Sans position centrale ON–ON	Sans position centrale ON–(ON)
	Ouvert en position centrale ON–OFF–ON	Ouvert en position centrale ON–OFF–ON

Figure 6-47. *Configurations d'interrupteurs.*

Sur la figure 6-47, le terme « action alternée », indique un interrupteur qui n'est pas maintenu par un ressort et restera en permanence à l'une ou l'autre des positions. « À action momentanée » signifie que vous devez maintenir votre appui pour conserver cette position.

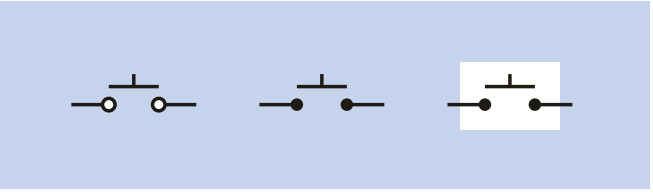


Figure 6-48. *Trois façons de représenter les boutons-poussoirs.*

Vous devez vous rappeler que les interrupteurs à action momentanée possèdent leur propre symbole : le bouton-poussoir. La figure 6-48 montre trois symboles les représentant. J'utiliserai le style de droite pour représenter tous les types de boutons-poussoirs, y compris les interrupteurs tactiles.

Étincelles

Quand vous faites une connexion électrique, il y a tendance à la création d'un arc quand le courant passe d'un contact à l'autre un court instant avant qu'ils ne se ferment. Quand vous ouvrez le contact, un autre arc à tendance à se former, cela est néfaste pour l'interrupteur. Les arcs usent les contacts jusqu'à ce qu'ils ne parviennent plus à faire une connexion fiable.

C'est moins problématique si vous commutez un courant d'intensité modérée sous une faible tension comme dans les circuits de ce livre. Néanmoins, si vous mettez en fonctionnement et interrompez la rotation d'un moteur, vous devez prendre la précaution d'utiliser un interrupteur assez résistant, car un moteur absorbe un courant important lors de son démarrage, au moins le double de son intensité de fonctionnement permanent. Ainsi, si vous avez un moteur consommant 2 A, vous devrez utiliser un interrupteur prévu pour couper 4 A pour contrôler sa mise en marche.

De même, lors du câblage d'une habitation, les puissances de coupures sont importantes. Dans mon atelier, j'ai des éclairages très puissants absorbant 8 A et ces lampes ont une intensité initiale d'allumage bien supérieure. L'électricien qui a câblé cette pièce n'avait pas imaginé que je puisse utiliser une source lumineuse aussi puissante si bien qu'il a installé un interrupteur standard. Lorsque je m'en suis rendu compte, je me suis demandé combien de temps il allait fonctionner. Trois années plus tard, les contacts ont finalement cédé sous l'influence des arcs et j'ai dû remplacer cet interrupteur par un modèle prévu pour 15 A.

Vous serez parfois tenté d'utiliser un interrupteur prévu pour une intensité de coupure inférieure à celle de l'application que vous projetez, car en fait cela fonctionne assez bien ! Néanmoins, cela tombera probablement en panne.

Premiers systèmes de commutation

Les interrupteurs semblent tellement fondamentaux dans notre environnement, et leur concept est si simple qu'on pourrait oublier qu'ils ont connu une évolution progressive. Les interrupteurs à lames convenaient aux pionniers de l'électricité qui voulaient simplement connecter et déconnecter quelques appareils dans leur laboratoire, mais une approche plus sophistiquée était nécessaire quand les systèmes téléphoniques ont commencé à se répandre. Typiquement, un opérateur dans un central de commutation devait connecter une paire quelconque de fils parmi des centaines, sur un tableau de connexions. Comment cela pouvait-il se faire ?

En 1878, Charles E. Scribner (figure 6-49) mit au point l'interrupteur à lame, ainsi nommé car l'opérateur le tenait comme le manche d'un canif. Une fiche d'environ 6 mm dépassait de l'interrupteur qui, une fois insérée dans une prise, établissait le contact à l'intérieur de cette dernière. C'est donc la prise qui constituait l'interrupteur.

Les connecteurs audio des guitares et des amplificateurs actuels fonctionnent selon le même principe. On les désigne par le terme «*jack*», en référence à l'invention de Scribner.

Figure 2-36. *En 1878, Charles E. Scribner invente l'interrupteur à lame* (jack-knife switch) *pour les besoins des standards téléphoniques de l'époque.*

Autres symboles

Je vous ai montré une variété de symboles utilisés pour représenter un interrupteur unidirectionnel. Voyons maintenant des variantes des symboles que vous avez déjà vus, comme celui d'une pile. Vous devez connaître les alternatives, au cas où vous utilisiez un schéma d'une autre provenance.

La figure 6-50 montre différentes façons d'indiquer une source d'alimentation dans un circuit. Dans la rangée supérieure, se trouvent trois options pour représenter une pile. Il s'agit traditionnellement d'une paire de lignes représentant une cellule de 1,5 volt, deux paires de lignes indiqueraient deux cellules s'ajoutant entre elles, soit 3 V, et ainsi de suite. Mais quand les circuits utilisent des tensions plus élevées, le dessinateur du schéma placerait une ligne en pointillés entre les cellules plutôt que d'en dessiner des douzaines alignées. La plupart des gens ne se soucient plus du nombre de cellules, mais si vous en voyez, vous savez ce que cela signifie.

Comment connaître la tenson totale d'une pile quand vous voyez une ligne en pointillés ? Vous ne pouvez pas le savoir, mais en général, le dessinateur indique la tension de façon écrite.

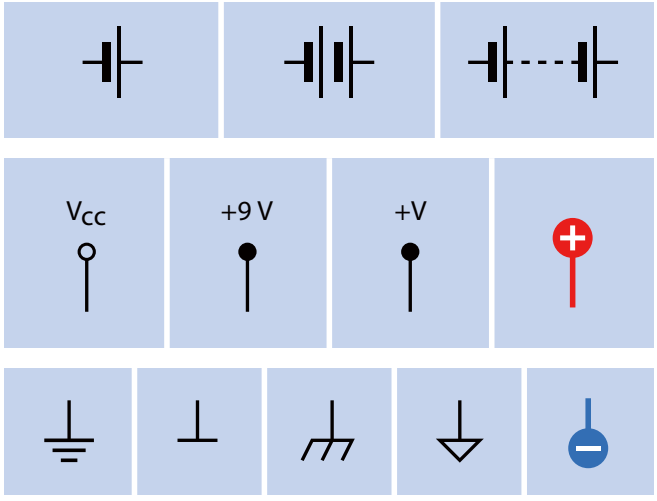


Figure 6-50. *Différentes façons de représenter une alimentation dans un schéma.*

Les symboles des piles ne sont plus souvent utilisés. Vous verrez plutôt des abréviations telles que Vcc, V+, +V ou V suivies d'un nombre. Cela indique où la tension positive est appliquée au circuit. À l'origine, Vc désignait la tension sur le collecteur d'un transistor, mais Vcc est utilisé, même si le circuit ne comporte pas de transistor. Beaucoup de gens disent Vcc sans savoir d'où cela provient.

Dans ce livre, j'ai utilisé le signe plus entouré d'un cercle rouge pour indiquer la tension d'alimentation positive, ainsi il n'y a pas de confusion possible.

Le pôle négatif de l'alimentation peut être indiqué par n'importe quel symbole de la rangée du bas de la figure 6-50 et peut être nommé *masse négative* ou simplement *masse*. Du fait que beaucoup de parties d'un circuit doivent être reliées à la masse, de multiples symboles de masse peuvent être disséminés dans un schéma.

Lorsque vous réalisez un circuit, vous devez connecter tous les points de masse ensemble d'une façon ou d'une autre. Vous pouvez utiliser des fils ou les connexions internes d'une plaque de montage, vous pouvez également apprendre à réaliser vos propres circuits imprimés comprenant des pistes de cuivre.

J'ai choisi d'utiliser le signe moins entouré d'un cercle bleu ce qui est intuitivement plus clair Vous trouverez d'autres symboles de masse dans des schémas dessinés par d'autres personnes Ils ont tous la même signification dans un circuit alimenté par une tension continue : référence zéro volt relative au pôle positif de l'alimentation.

Dans un gadget utilisant le *courant alternatif* d'une prise murale, la situation est plus compliquée, car la prise possède trois bornes pour relier *phase, neutre* et connexion à la *terre*.

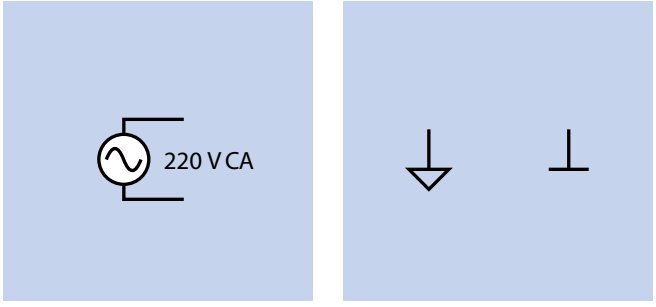


Figure 6-51. *Source d'alimentation et masse d'un circuit alimenté en CA.*

Un schéma utilisant le courant électrique d'une prise murale indique la source CA par une forme en S tournée sur le côté comme sur la figure 6-51. La valeur de l'alimentation est indiquée. En Europe, elle est habituellement de 220 volts. Partout dans le circuit, les symboles de la partie droite de la figure 6-51 se réfèrent au châssis métallique de l'appareil dans lequel l'électronique est installée. Le châssis est par ailleurs relié à la borne de terre de la prise murale si un cordon d'alimentation à trois conducteurs est utilisé.

Notez que la broche de terre d'une prise de courant CA dans votre logement est réellement reliée à la terre à l'extérieur du bâtiment. Quand j'ai demandé le raccordement au réseau électrique dans une localité isolée, la compagnie d'électricité m'a demandé de planter un piquet recouvert de cuivre d'environ 2,5 m dans le sol, pour relier la maison que je construisais à la terre. Notre planète a une grande capacité de stockage d'électrons.

Permettez-moi de revenir sur le symbole des LED traversantes. Elles peuvent être représentées de nombreuses façons qui ont toutes la même signification. J'en ai disposé une sélection sur la figure 6-52. La grande flèche à l'intérieur du symbole indique la direction de parcours du courant selon les conventions, alors que la petite flèche indique que ce composant émet de la lumière. Pourquoi existe-t-il plus d'une version de ce symbole ? C'est un mystère. Personnellement, je continue à utiliser un contour blanc pour distinguer ce composant du reste du circuit.

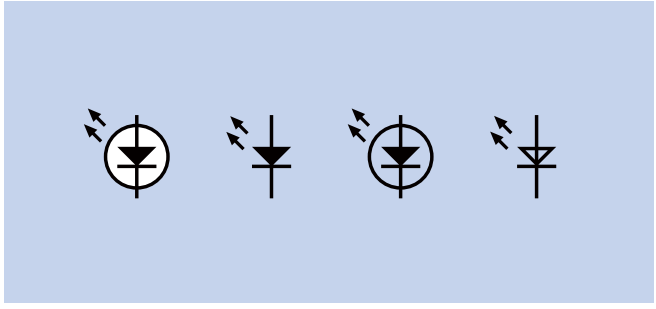


Figure 6-52. *Quatre représentations d'une LED dans un schéma.*

Remarquez que le symbole d'une LED peut être orienté de façon quelconque selon ce qui convient le mieux au dessinateur du schéma, et la paire de flèches peut être orientée à gauche ou à droite, cela n'a aucune importance.

Même une simple résistance peut être représentée sous différents aspects. Sur la figure 6-53, j'ai représenté le symbole en zigzag, très populaire aux États-Unis, mais le style de droite est utilisé en Europe. Ces deux résistances ont une valeur de 4,7K, mais cela pourrait être une autre valeur. Souvenez-vous qu'en Europe, la lettre R, K ou M est placée à la place de la virgule pour indiquer que la valeur est exprimée en ohms, kilo-ohms ou mégaohms.

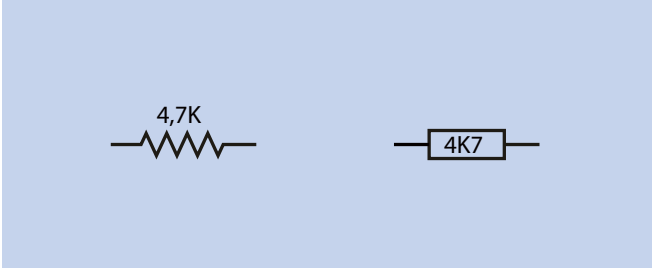


Figure 6-53. *Résistance de 4,7K selon les notations américaine (à gauche) et européenne (à droite).*

Dessiner un schéma

Beaucoup de gens se rendent sur Internet et utilisent un logiciel de dessin de circuits pour créer un schéma. Vous trouverez des sites avec une telle offre en utilisant un argument de recherche tel que : «`Logiciel de simulation électronique en ligne`».

C'est facile, car vous n'avez qu'à placer des composants puis tracer des lignes entre eux pour indiquer les connexions, le simulateur vous indiquera alors ce qui se passe quand le circuit est mis sous tension.

La figure 6-54 montre un schéma typique. Il comprend certains symboles que vous ne connaissez pas encore. Mais vous pouvez reconnaître le pôle positif de la source d'alimentation en haut du schéma et le symbole de masse en bas (nommé GND). Vous pouvez également reconnaître les LED (sans cercles autour) et les résistances (selon la notation européenne, bien que leurs valeurs soient indiquées selon la notation américaine).

Chaque composant est identifié par un code tel que D1 ou R1, ce qui vous permet de vous y référer facilement quand vous décrivez le circuit. Les LED apparaissent avec les

flèches orientées vers le bas et non vers le haut ce que je trouve étrange, mais c'est juste dû au mécanisme de positionnement des symboles du logiciel. Toutes les informations sont présentes, le schéma est cependant visuellement peu agréable.

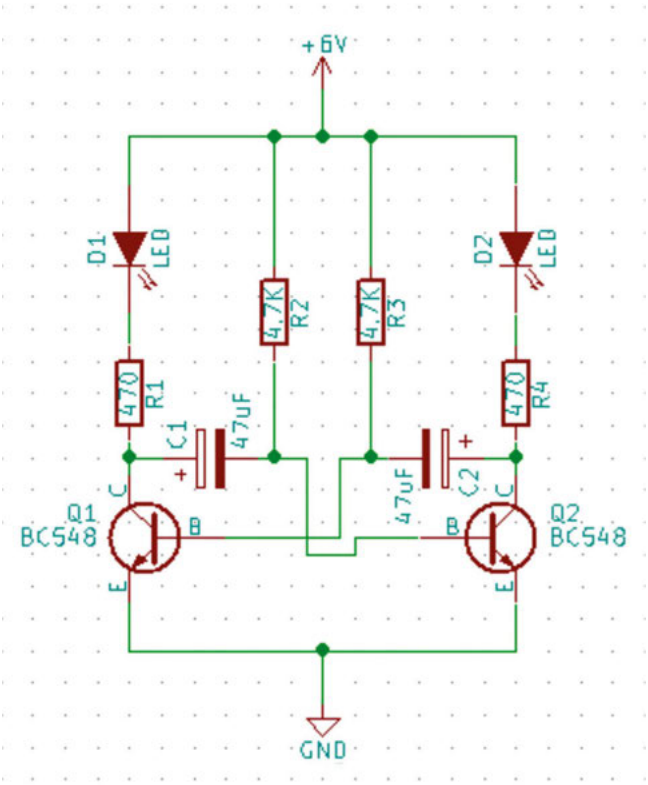


Figure 6-54. *Schéma créé à l'aide d'un logiciel de schématique électronique.*

Les dessinateurs ont l'habitude de placer le pôle positif de l'alimentation en haut et la masse du circuit en bas, cela permet d'imaginer que le courant circule de haut en bas, comme en hydraulique. L'inconvénient de ce schéma c'est que si vous le réalisez sur une plaque d'essais, le courant circulera horizontalement entre les bus verticaux. En général, les ouvrages d'électronique considèrent que, mentalement, vous transposerez aisément un schéma de principe en câblage sur une plaque de montage, mais ce n'est pas très facile et peut conduire à faire des erreurs. C'est pourquoi les schémas de ce livre sont organisés afin de correspondre au plus près à leur implantation sur une plaque de prototypage.

Croisements

Les circuits se compliquant de plus en plus, il est souvent nécessaire de dessiner des connexions qui se chevauchent sans réaliser de connexion électrique. La moitié haute de la figure 6-55 montre trois façons de le faire. J'y ai incorporé deux styles obsolètes, au cas où vous les rencontreriez.

Le «style très ancien» a un gros avantage : personne ne peut s'y méprendre. Par contre, les logiciels de schématique ne les supportent plus.

Le «style ancien» était utilisé dans les années 1960, mais il prêtait à confusion et il est également devenu obsolète, vous pourrez toutefois le rencontrer si vous consultez des schémas d'anciens ouvrages.

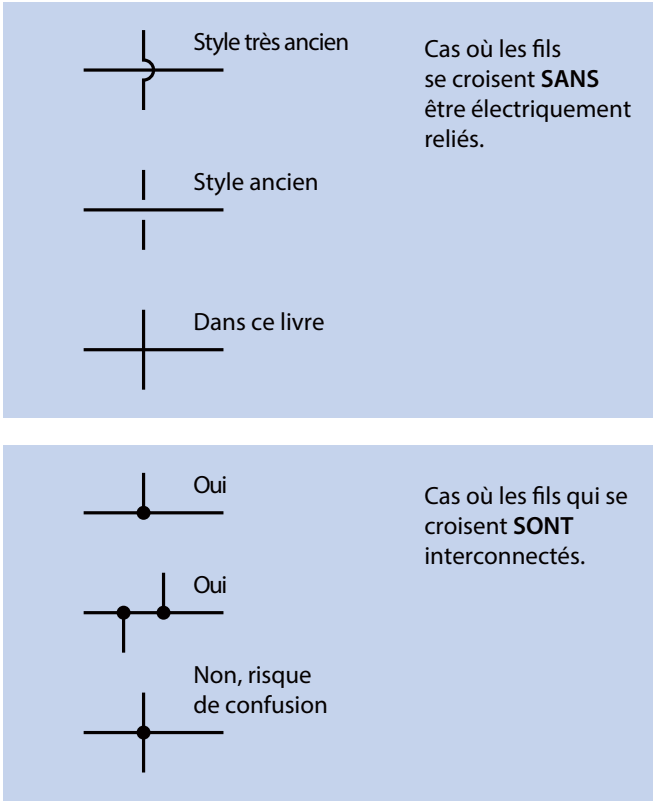


Figure 6-55. *Différents styles représentant des fils qui sont, ou ne sont pas, interconnectés.*

Le troisième style est quasiment universel. D'ailleurs, c'est celui que j'utilise dans cette édition. La règle est simple :

Dans un schéma, l'absence de point signifie absence de liaison.

Inversement, si un point est présent, il y a toujours une connexion électrique comme l'indique la figure 6-55. Parfois vous verrez des schémas dans lesquels des petits points sont utilisés, ce qui exige une vigilance quand on les consulte. De plus, si quelqu'un en réalise une photocopie, les petits points risquent de disparaître. Personnellement, j'utilise toujours des points plus gros.

Autre point qu'il me faut ajouter : les « croisements » en bas de la figure 6-55, où quatre fils sont reliés, sont assez fréquents mais souvent mal interprétés car ils ressemblent à un croisement où les fils ne seraient pas interconnectés, en particulier si les points sont mal imprimés. Le style représenté immédiatement au-dessus est une alternative bien meilleure.

La couleur des liaisons

Souhaitant vous éviter toute confusion entre les pôles positif et négatif de la source d'alimentation électrique, je vais colorer toutes les lignes d'alimentation positives en rouge dans les schémas, alors que les lignes négatives / masse, seront en bleu. Vous remarquerez que j'ai déjà utilisé cette convention sur la figure 6-42.

Je sais que certains lecteurs sont daltoniens, mais la confusion entre le bleu et le rouge est rare.

Expérience 7
Étude d'un relais

Dans la prochaine étape de votre découverte de la commutation vous allez utiliser un interrupteur contrôlé à distance qui se ferme quand vous lui appliquez un signal électrique. Ce type d'interrupteur est un *relais*, car il relaie une instruction fournie par une partie d'un circuit vers une autre. C'est un dispositif *électromécanique*, car il utilise et commute de l'électricité mais contient des constituants mécaniques comprenant des contacts et un levier de commande. Les transistors ont remplacé les relais dans de nombreuses applications, mais pas dans toutes. Les automobiles, par exemple, contiennent de nombreux relais, et je pense que vous en trouverez également dans un lave-vaisselle, un réfrigérateur, ou une climatisation.

Vous aurez besoin de :

- 1 pile de 9 V
- 1 relais DPDT avec bobine 9 V CC
- en option, un second relais
- 1 interrupteur tactile
- 3 fils de test (1 rouge, 1 noir et 1 d'une autre couleur)
- 1 canif
- 1 multimètre

Le relais

Le relais de cette expérience doit posséder deux broches d'un côté et six de l'autre. Les six broches sont organisées en deux rangées de trois (figure 7-1). Le relais est renversé, avec les broches au-dessus. Pour plus d'informations au sujet des relais compatibles avec cette expérience, consultez l'annexe A.

Certains relais anciens, très robustes, sont protégés par un boîtier en plastique transparent vous permettant de voir leur mécanisme interne. Malheureusement, la plupart des relais ne vous permettent plus cette observation, mais vous pouvez en ouvrir un à titre de curiosité. Si vous le faites avec précautions, il sera encore utilisable par la suite, sinon, vous aurez dépensé un peu d'argent pour découvrir et apprendre.

Attention à la polarité

La tension que vous appliquez à un relais pour le faire agir s'appelle la *tension de commande*. Cette tension est appliquée à une paire de broches externes, reliées à une *bobine* à l'intérieur du relais.

Dans la plupart des relais, la bobine n'est pas polarisée, le côté positif de son alimentation peut être relié à l'une ou l'autre de ses bornes. Dans certains autres, le respect de la polarité est important. Le type de relais que je préconise pour cette expérience n'est pas sensible à la polarité, mais si vous utilisez d'autres types de relais, vérifiez toujours leurs fiches techniques pour être sûr.

Faisons biper le multimètre

La première étape consiste à s'assurer que votre relais fonctionne correctement. Sur la figure 7-1, le relais est relié de façon à ce qu'un bouton-poussoir (interrupteur tactile) relie votre pile à la bobine interne du relais. Votre multimètre réglé pour la vérification de continuité devrait biper quand l'interrupteur interne du relais relie les deux contacts les deux broches auxquelles sont connectées les pointes de touche de votre multimètre.

Vous devriez également entendre un léger « clic » quand le relais commute, si vous êtes malentendant, vous devriez pouvoir ressentir une petite vibration du relais quand ses contacts sont mis en relation.

Déplacez maintenant le fil noir du multimètre vers la broche libre voisine de la pointe de touche rouge. Le comportement du multimètre devrait être inversé, il devrait biper quand vous n'enfoncez pas le poussoir. Si vous imaginez que ce relais comporte un interrupteur bidirectionnel interne, vous avez raison. Le courant issu de la pile provoque le basculement de cet interrupteur.

En quoi est-ce utile ? Un relais peut être déclenché par une tension et un courant faibles, mais il peut commuter une tension plus élevée sous une intensité importante. Par exemple, quand vous démarrez le moteur de votre voiture,

un petit interrupteur (ou un capteur contrôlé par une télécommande sans fil) envoie un signal dans un petit câble peu coûteux à un relais proche du démarreur. Le relais actionne le moteur alimenté par un câble beaucoup plus robuste et coûteux, capable de transporter plus de 100 ampères. De façon similaire, dans une machine à laver, le programmateur envoie un faible signal à un relais qui actionne le moteur du tambour rempli de linge mouillé.

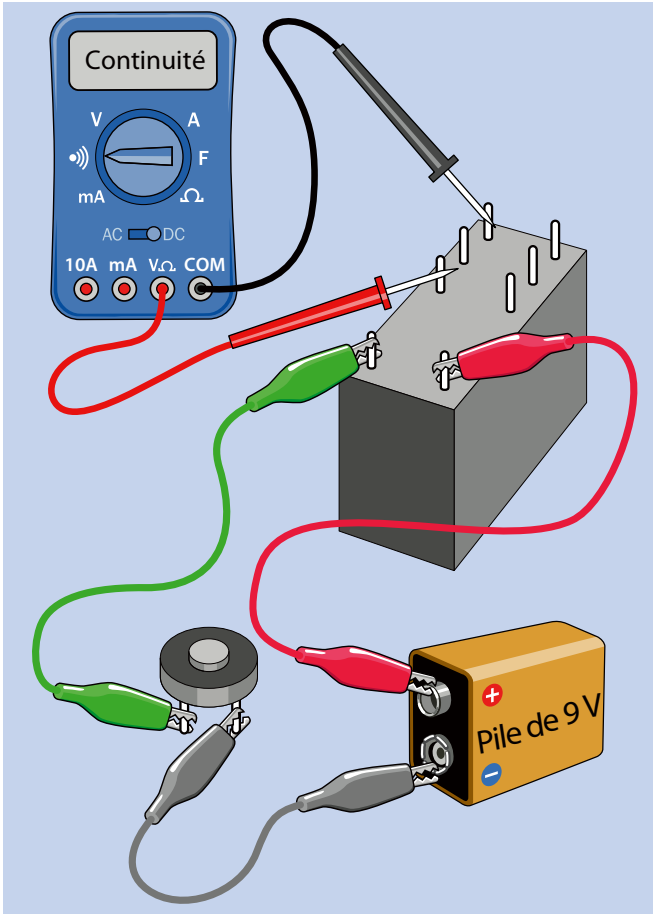


Figure 7-1. *Première étape permettant de comprendre le fonctionnement interne du relais.*

À l'intérieur d'un relais

La figure 7-2 montre une vue en transparence de l'intérieur du relais, avant d'avoir appuyé sur le bouton-poussoir.

Sur la figure 7-3, le poussoir est enfoncé et le champ magnétique créé par la bobine provoque la fermeture des interrupteurs internes. Remarquez qu'il s'agit d'un relais DPDT bipolaire dont on n'utilise que les contacts à gauche.

Vous vous demandez peut-être comment la bobine repousse la lamelle du contact. C'est parce qu'un levier à l'intérieur du relais convertit le mouvement. Vous pourrez le constater quand vous ouvrirez le relais dans la suite de cette expérience.

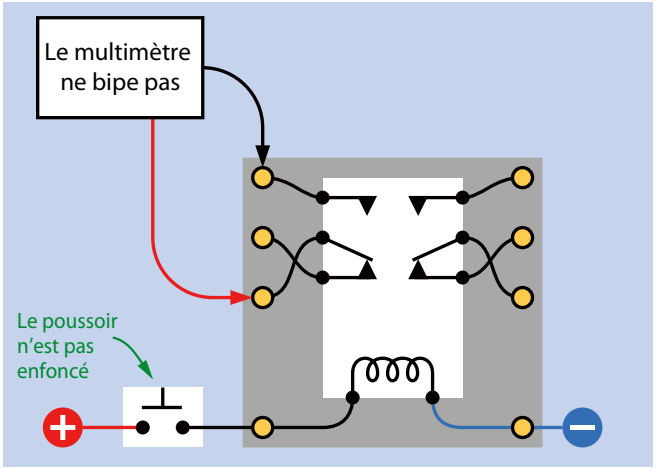


Figure 7-2. *Intérieur du relais.*

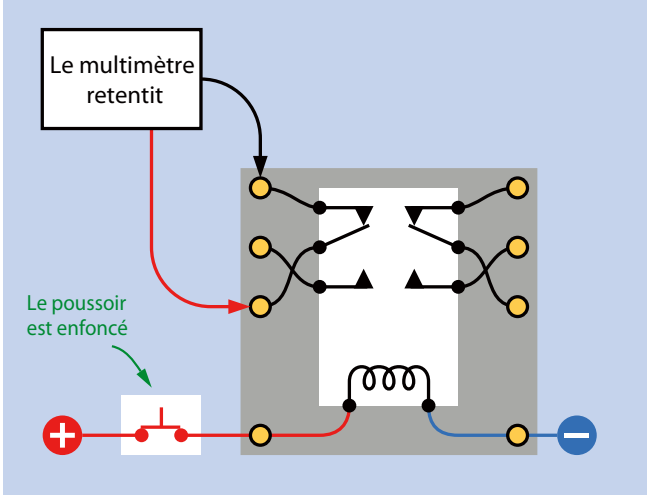


Figure 7-3. *La bobine bascule l'interrupteur à l'intérieur du relais.*

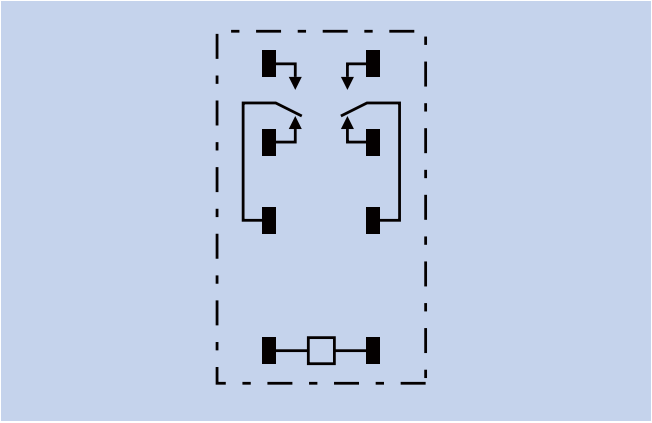


Figure 7-4. *Brochage d'un relais issu d'une fiche technique.*

Autres relais

Je pense que le rôle des broches que je viens de décrire correspond à la majorité des relais de cette taille. Néanmoins, certains relais ont un fonctionnement différent. Quand vous utilisez un relais pour la première fois, vous pouvez savoir comment il fonctionne en consultant sa fiche technique, ou bien en testant chacune des différentes paires de broches avec votre multimètre tout en appliquant la tension de commande à la bobine. Par élimination, vous trouverez comment les broches sont reliées aux éléments internes du relais. Dans presque tous les cas, une paire de broches sera séparée des autres, il s'agit alors des broches de la bobine de commande qui activera le relais.

Si vous consultez la fiche technique d'un relais, vous devriez trouver un diagramme similaire à celui de la figure 7-4 fourni par un fabricant du relais que vous utilisez. Ce diagramme a un style différent de celui que j'utilise sur la figure 7-3, mais vous verrez que les liaisons sont identiques.

Voici quelques caractéristiques importantes des relais :

- Certains relais sont à *verrouillage*, c'est-à-dire que leurs contacts internes restent dans leur position quand ils ne sont plus alimentés. Ce type de relais est moins répandu, mais il a l'avantage de ne pas nécessiter d'appliquer continuellement la tension de commande pour maintenir ses contacts fermés (ou ouverts). Vous devez appliquer une impulsion brève pour le faire basculer dans un état, et une impulsion différente pour le ramener à son état initial.
- Certains relais sont bipolaires, d'autres unipolaires. Certains relais sont bidirectionnels, d'autres monodirectionnels.
- Certains relais nécessitent une tension de commande alternative, d'autres une tension continue.

La figure 7-5 montre une sélection de symboles de schématique pour différents types de relais. Le type A est unipolaire unidirectionnel (SPST).

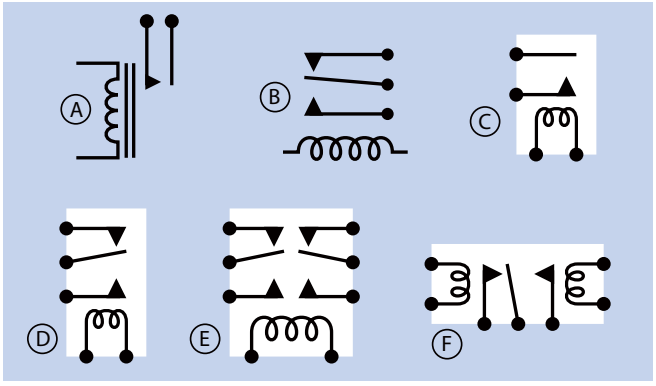


Figure 7-5. *Symboles de schématique pour différents types de relais.*

Le type B est unipolaire bidirectionnel (SPDT). Le type C est unipolaire unidirectionnel, représenté selon la notation que j'utilise, avec un rectangle rappelant que ce composant est inséré dans un boîtier. Le type D est unipolaire bidirectionnel. Le type E est bipolaire bidirectionnel. Enfin, le type F est unipolaire bidirectionnel à verrouillage.

La plupart des symboles des relais font croire que la bobine va attirer les contacts. Malheureusement, beaucoup de relais donnent l'impression de faire le contraire. Vérifiez toujours leurs fiches techniques pour savoir ce qu'il se passe réellement.

Les schémas comportant des relais sont toujours dessinés avec les relais en position de *repos*, quand aucune tension de commande ne leur est appliquée, à l'exception des relais à verrouillage dont la position est arbitraire.

Le type de relais que vous avez testé est un *relais de faible puissance* ce qui signifie qu'il ne peut pas commuter une

intensité importante. Sa fiche technique vous renseignera sur ses limites d'utilisation. De plus gros relais permettent de commuter de fortes intensités. Il est important de choisir un relais dont les contacts sont prévus pour l'intensité maximum procurée par votre circuit, de façon identique au choix d'un interrupteur pouvant commuter correctement la puissance mise en jeu. Dans les expériences à venir, vous découvrirez quelques usages pratiques des relais, par exemple dans un verrou électronique à combinaison. Avant cela, je vais vous montrer comment transformer un relais en oscillateur, mais tout d'abord je pense que nous devrions en découvrir l'intérieur.

À l'intérieur d'un relais

Si vous êtes impatient, vous pouvez ouvrir votre relais selon la méthode des figures 7-6 ou 7-7. Généralement, vous préférerez probablement utiliser un moyen plus respectueux : un cutter ou un canif.

Figure 7-6. *Première option pour ouvrir un relais (pas recommandée).*

Les figures 7-8 et 7-9 montrent la technique que je préfère. Utilisez un cutter pour inciser légèrement les arêtes du boîtier en plastique jusqu'à obtenir une ouverture de la finesse d'un cheveu. Ne poussez pas la lame davantage, l'intérieur d'un relais est très fragile et ses éléments seront proches de votre couteau. Faites d'abord sauter le capot supérieur. Répétez cela tout autour du boîtier puis enlevez le reste du boîtier. Si vous faites cela avec précaution, le relais sera ouvert mais toujours utilisable et fonctionnera en appliquant la tension de commande à sa bobine.

Figure 7-7. *Deuxième option pour ouvrir un relais (pas du tout recommandée).*

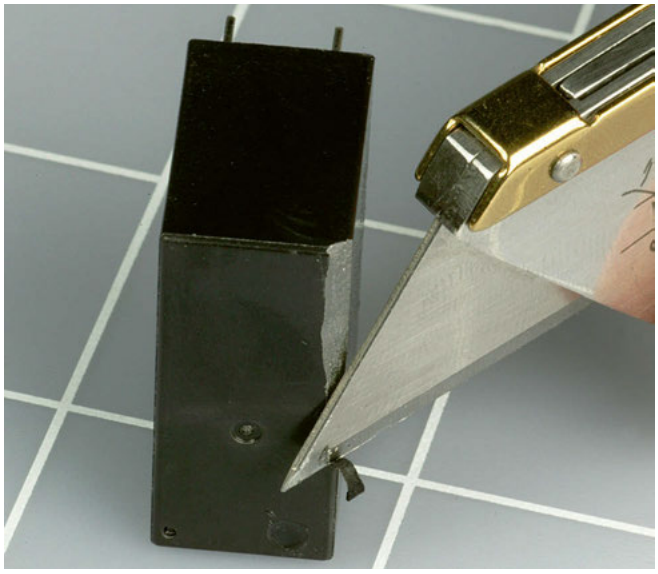


Figure 7-8. *La découpe des arêtes du boîtier plastique d'un relais est la première étape à suivre pour l'ouvrir. Procédez toujours en éloignant la lame de vous, vers le bas, sur un plan de travail.*

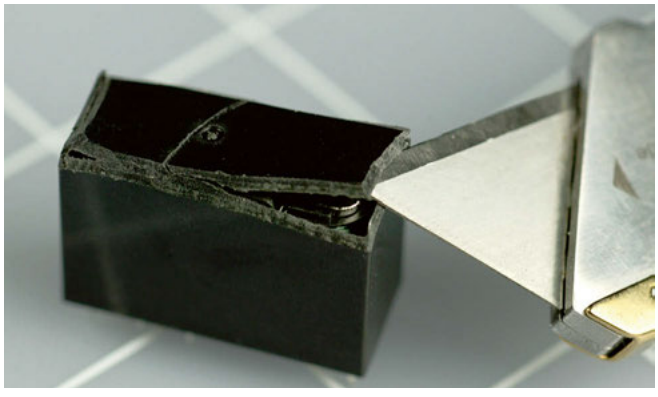


Figure 7-9. *Après avoir découpé les arêtes, vous devriez pouvoir glisser la lame du cutter sous le capot pour le retirer.*

Cette procédure sera plus sécurisante si vous pouvez maintenir le relais dans un étau ou une pince pendant que vous agissez. Tenez toujours vos doigts le plus éloignés possible de la lame du cutter et poussez la lame vers le bas.

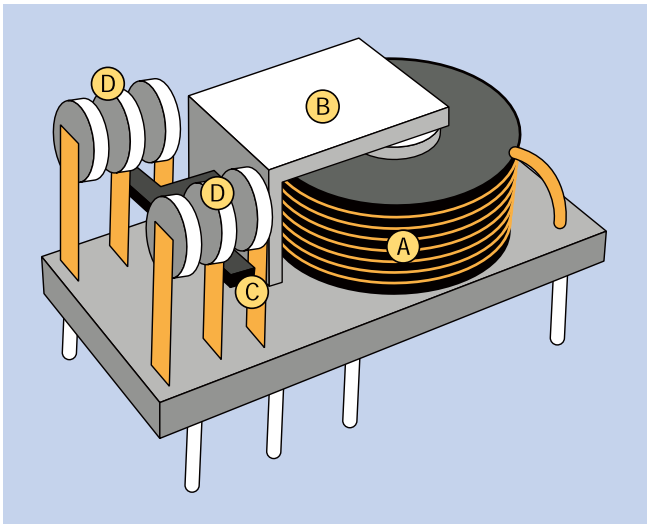


Figure 7-10. *Éléments constituant un relais. Voir le texte pour les détails.*

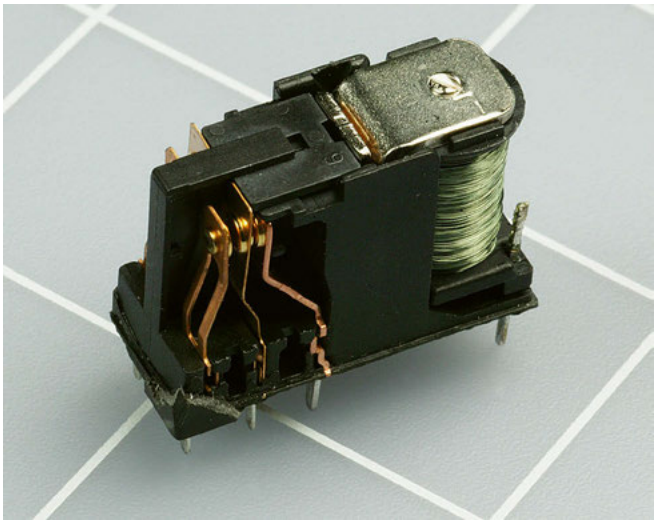


Figure 7-11. *Intérieur d'un relais de faible puissance.*

Qu'y a-t-il dedans ?

La figure 7-10 est une vue simplifiée des composants internes d'un relais typique. La bobine A génère un champ magnétique qui attire la palette B vers le bas. Une pièce

en plastique C pousse les lames métalliques flexibles et déplace ainsi les pôles du relais, D, entre les contacts.

Vous pouvez comparer cette illustration à la photo du relais que j'ai ouvert sur la figure 7-11. Il est posé sur un tapis comportant des zones carrées de 25,4 mm de côté.

Des relais de tailles différentes avec leurs boîtiers retirés sont représentés sur la figure 7-12. Ils sont tous prévus pour une tension de 12 V CC. Le relais pour automobile à l'extrémité gauche est le plus simple et le plus facile à appréhender, car les gens qui l'ont conçu étaient peu concernés par son encombrement. Il y a un espace important dans la carrosserie d'une voiture pour y loger des relais mesurant plus de 25 mm de côté.

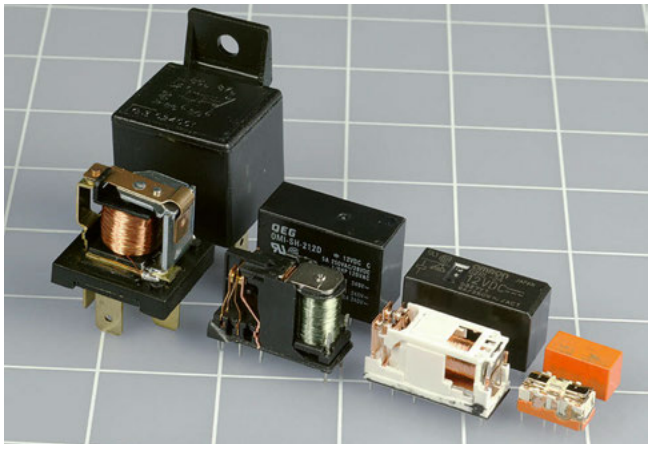


Figure 7-12. *Divers relais 12 V CC.*

Terminologie propre aux relais

La **tension de bobine** (*coil voltage* en anglais) est la tension qui doit être appliquée à la bobine pour commander le fonctionnement du relais.

La **tension de commande minimale** (*set voltage* en anglais) est la tension minimale pour la faire fonctionner. Elle est inférieure à la tension nominale (idéale) de la bobine. En pratique, un relais s'actionnera probablement avec une tension inférieure, mais la tension de commande minimale garantit le fonctionnement du relais.

L'**intensité de fonctionnement** (*operating current* en anglais) est l'intensité consommée par la bobine, habituellement exprimée en milliampères, parfois en milliwatts, lorsque le relais est activé.

La **capacité de commutation** (*switching capacity* en anglais) indique l'intensité maximale supportée par les contacts du relais sans être endommagés. Cette valeur est en général spécifiée pour une *charge résistive* correspondant à un composant passif, par exemple une lampe à incandescence. Si vous utilisez un relais pour commander un moteur, vous lui imposez une *charge inductive*, qui requiert une surintensité importante au démarrage, jusqu'à ce que le moteur atteigne sa pleine vitesse. L'arrêt du moteur provoque une autre surcharge. Si la fiche technique d'un relais ne mentionne pas la possibilité de contrôler une charge inductive, la règle est de considérer qu'un moteur peut consommer jusqu'au double de son intensité nominale au démarrage.

Expérience 8
Un oscillateur à relais

En utilisant des fils de tests munis de pinces crocodiles dans les expériences précédentes, il y avait deux avantages importants : vous pouviez assembler un circuit rapidement et voir ses connexions aisément.

Progressivement vous devrez vous habituer à adopter le moyen de prototypage le plus répandu : les *plaques de montage sans soudure*.

Dans les années 1940, les circuits étaient réalisés sur des sortes de planches à pain où les fils et les composants étaient cloués, agrafés ou vissés, car c'était plus simple que de perforer une plaque de métal. Rappelons-nous que le plastique était rare à cette époque. (Pourriez-vous imaginer un monde sans plastique ?)

Aujourd'hui, une plaque de montage sans soudure est une petite dalle d'environ 15 cm par 5 cm d'une épaisseur inférieure à 12,5 mm. C'est un moyen pour créer un circuit, plus rapide que de clouer les composants sur une plaque de bois, mais il y a un inconvénient car les connexions réalisées ne sont pas apparentes. Pour y remédier, il existe une astuce que je détaillerai plus loin.

Je pense que pour commencer, vous devez vous lancer et assembler un circuit, en partant de l'expérience précédente utilisant un relais.

Vous aurez besoin de :

- 1 pile de 9 V
- 1 connecteur de pile (optionnel)
- 1 plaque de montage
- 1 relais DPDT de 9 V
- 2 LED génériques
- 1 interrupteur tactile
- résistances : 100 ohms (1), 470 ohms (1), 1K (2)
- condensateurs électrochimiques : 100 µF (1), 1000 µF (1)
- 1 condensateur céramique de 1 µF
- 1 pince plate, 1 pince coupante et 1 pince à dénuder
- 2 longueurs de fil de câblage de deux couleurs d'environ 15 cm chacune

Fabrication des fils de pontage

Pour réaliser un circuit sur une plaque de montage, vous aurez besoin de fils de pontage comme ceux de la figure 6-14. Commencez en les faisant vous-même.

Enserrez un morceau de fil de câblage dans l'encoche appropriée de votre pince à dénuder comme sur la figure 8-1.

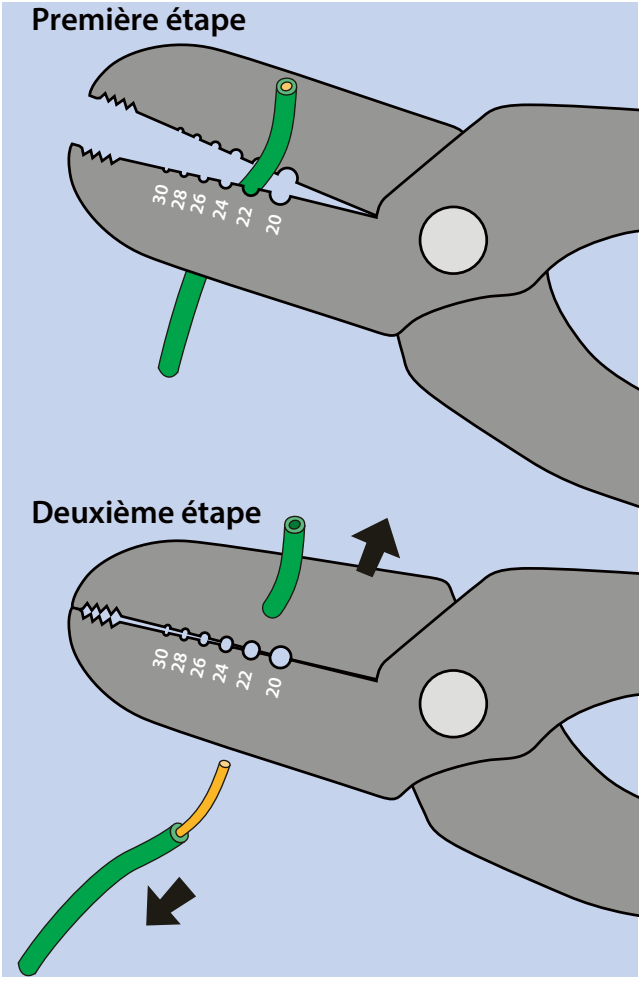


Figure 8-1. *Dénudage d'une extrémité d'un morceau de fil de câblage.*

Vous devez utiliser du fil de jauge 22 (0,65 mm de diamètre) et si vous avez acheté une pince à dénuder appropriée, elle devrait comporter une encoche marquée 22. Les encoches sont prévues pour entailler la gaine isolante sans atteindre le fil de cuivre conducteur.

Dans l'étape suivante, après avoir refermé la pince à dénuder, tirez-la vers le haut tout en tirant le fil vers le bas comme indiqué par les flèches de la figure.

Maintenant que vous savez comment dénuder un fil, je vais vous montrer la façon la plus simple de réaliser des fils de pontage d'une longueur spécifique. Les différentes étapes sont indiquées sur la figure 8-2. Commencez par retirer l'isolant sur environ 50 mm et jetez-le. Deuxièmement, mesurez le long de l'isolant restant une distance égale à la longueur du fil de pontage que vous voulez fabriquer. Rappelez-vous que les trous de votre plaque de montage sont espacés d'intervalles de 2,54 mm.

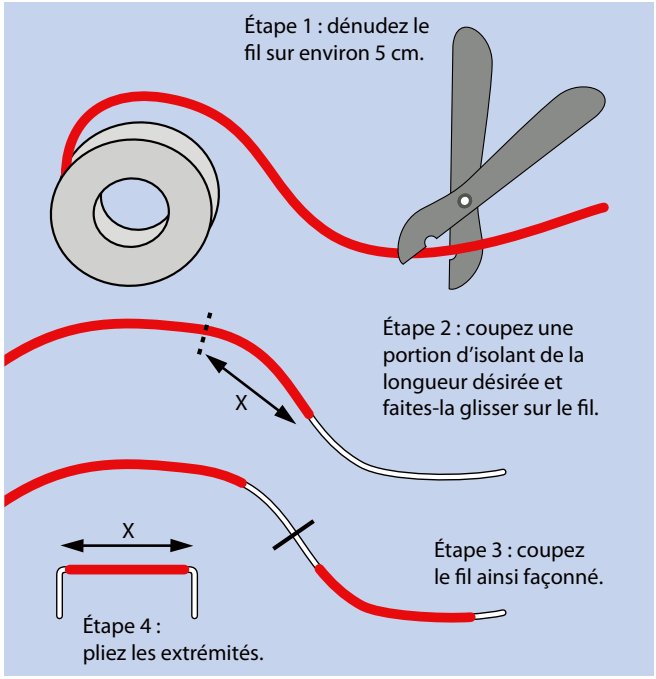


Figure 8-2. *Procédure de fabrication des fils de pontage.*

Je me souviens que vous allez avoir besoin de fils de pontage bleus et rouges de longueur 12,5 mm. Une paire alimentera la plaque de montage à partir de la pile, et deux autres paires seront utilisées dans la plaque. Ayant cela en tête, la distance marquée « X » sur la figure doit être 12,5 mm et vous devez fabriquer trois fils de pontages rouge et trois bleus.

Mise sous tension

Un *bus* est un conducteur électrique qui transporte l'alimentation aux composants. Vous reliez la source d'alimentation à une extrémité du bus, et les composants s'y connectent.

De chaque côté, votre plaque de montage possède deux paires de bus enfouies sous le plastique. Tous les bus sont physiquement identiques, mais ils sont identifiés par des traits rouges et bleus pour vous rappeler lequel utiliser pour les pôles positif et négatif de l'alimentation. Tous les dessins de mes plaques de montage montrent un trait rouge à gauche, il serait préférable que vous preniez l'habitude d'orienter vos plaques de cette façon.

Initialement, je vais utiliser un seul bus de chaque paire afin de ne pas faire de liaisons compliquées. Vous devez relier le pôle positif de la pile au bus rouge le plus à gauche, et le pôle négatif au bus bleu le plus à droite. Cette façon de faire est montrée sur la figure 8-3 où les fils de pontage ont été insérés dans la plaque et pliés à angle droit pour permettre aux pinces crocodiles reliées à la pile de s'y relier.

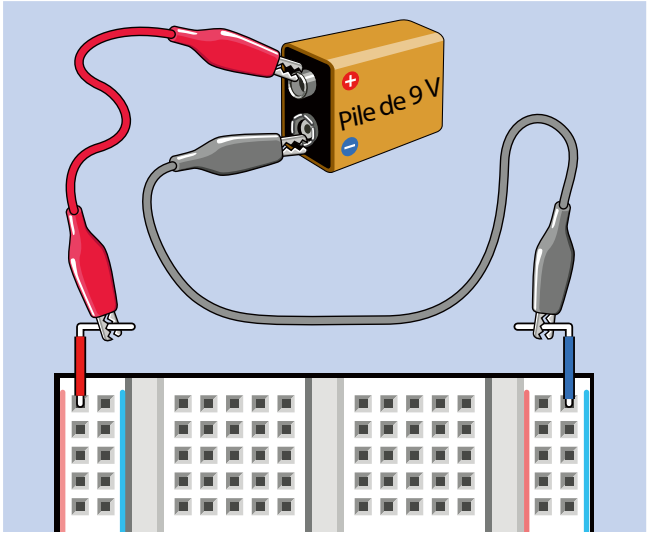


Figure 8-3. *Alimentation de votre plaque de montage par des fils de test et des fils de pontage.*

La figure 8-4 montre une autre option utilisant un connecteur de pile dont l'extrémité de chaque fil est dénudée. Vous pouvez ainsi insérer les fils directement dans votre plaque de montage ce qui semble être une option facile, mais les fils sont très fins et peuvent être difficiles à insérer. Ils ne seront pas aussi efficaces que des fils de câblage et pourront facilement se retirer au moment le moins opportun. Personnellement, je préfère utiliser les fils de tests de la figure 8-3.

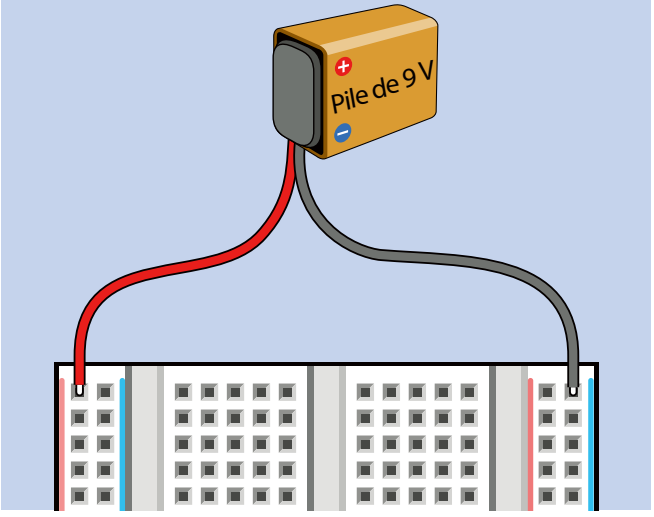


Figure 8-4. *Alimentation de votre plaque de montage par un connecteur de pile.*

Votre première réalisation

Je pense que les schémas sont plus explicites que les photos pour illustrer le câblage des plaques de montage, c'est donc cela que je vais utiliser dans ce livre. La figure 8-5 montre certains des composants que vous verrez. Vous ne les avez pas encore utilisés, mais vous pourrez vous référer ultérieurement à cette figure.

Voici maintenant quelques informations importantes à connaître au sujet des symboles picturaux :

- Broches cachées. Quand un composant comprend des broches situées sous son boîtier et que je ne peux pas facilement les montrer, j'indiquerai leur place par des points de couleur violette entourés d'un cercle blanc. Vous pouvez le voir dans l'interrupteur tactile (bouton-poussoir), l'interrupteur à glissière, la résistance ajustable et le relais.
- De nombreux composants sont représentés par une vue en perspective de côté afin de les rendre plus réalistes. Quand vous les insérez dans une plaque de montage, ils doivent être placés à plat et rester verticaux.
- Je vais ajouter le signe plus (+) le long du fil le plus long de chaque LED, chaque condensateur électrochimique sera accompagné d'un signe moins (-) pour vous rappeler de vérifier le signe moins imprimé sur son corps en aluminium. (Je vous présenterai les condensateurs ultérieurement au cours de cette expérience.)

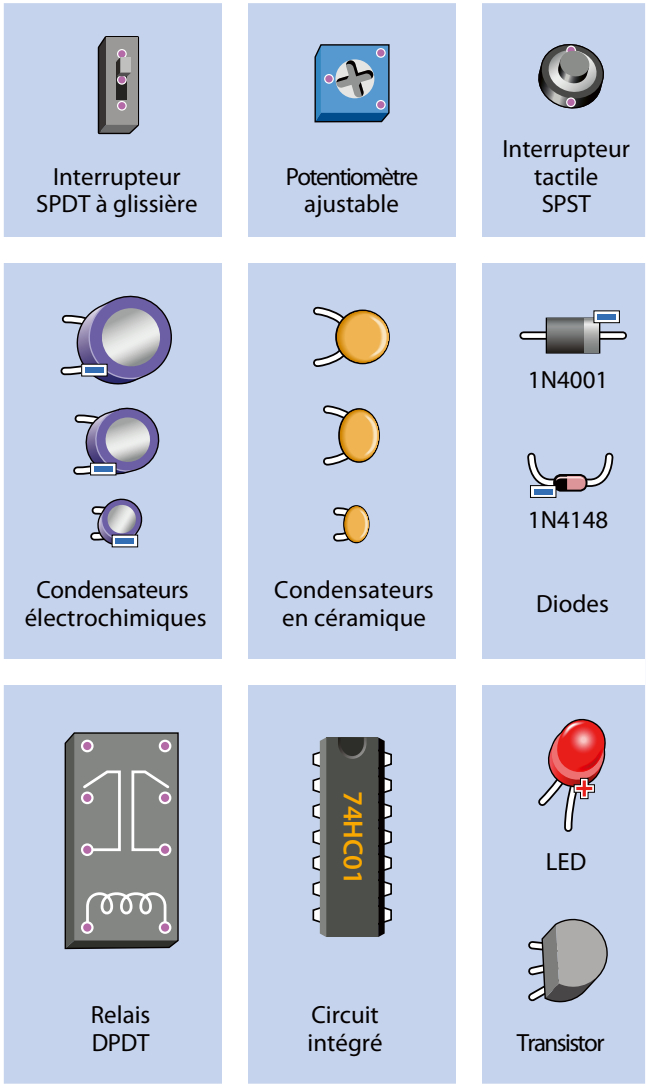


Figure 8-5. *Composants que vous utiliserez sur une plaque de montage.*

- La connexion négative d'une diode (la cathode) sera identifiée d'une façon ou d'une autre par le fabricant, mais j'ajouterai un signe moins (-), c'est plus sûr ainsi. Si cela vous intéresse, ce type de diode a précédé les diodes LED que vous connaissez maintenant.

- J'ai représenté les contacts du relais par une vue intérieure en transparence pour rappeler son fonctionnement.

Sur la figure 8-6, le circuit utilise le même relais que celui utilisé dans l'expérience 7. Pour plus de facilité, ses deux rangées de broches sont écartées de 7,5 mm, ce qui permet de l'insérer au-dessus de l'espace central de la plaque de montage. Vous reconnaîtrez également une résistance marquée 470 ohms, et deux LED rouges. Le bouton-poussoir est un interrupteur tactile dont les broches sont espacées de 5,08 mm ce qui permet de l'insérer facilement sur la plaque.

Remarquez que les deux fils rouges à gauche et les deux fils bleus à droite sont des fils de pontage qui ont été insérés dans la plaque.

Remarque au sujet du formatage : dans les plans des plaques de montage, j'indique les valeurs des composants dans des bulles oblongues de couleur bleu ciel afin de les distinguer des trous de la plaque. Je n'ajouterai pas ces bulles dans les schémas car ce n'est pas nécessaire.

Appliquez maintenant la tension d'alimentation au circuit, la LED à gauche devrait s'allumer. Appuyez sur l'interrupteur tactile (le bouton-poussoir en bas à gauche), la LED à gauche devrait s'éteindre alors que celle de droite s'allume. Voici votre premier circuit réalisé sur une plaque de montage. Il faut maintenant que vous compreniez comment les connexions internes lui ont permis de fonctionner.

À l'intérieur de la plaque de montage

Sur la figure 8-7, j'ai montré les barrettes internes qui réalisent les liaisons avec des petits points indiquant où chaque fil d'un composant pouvait être relié.

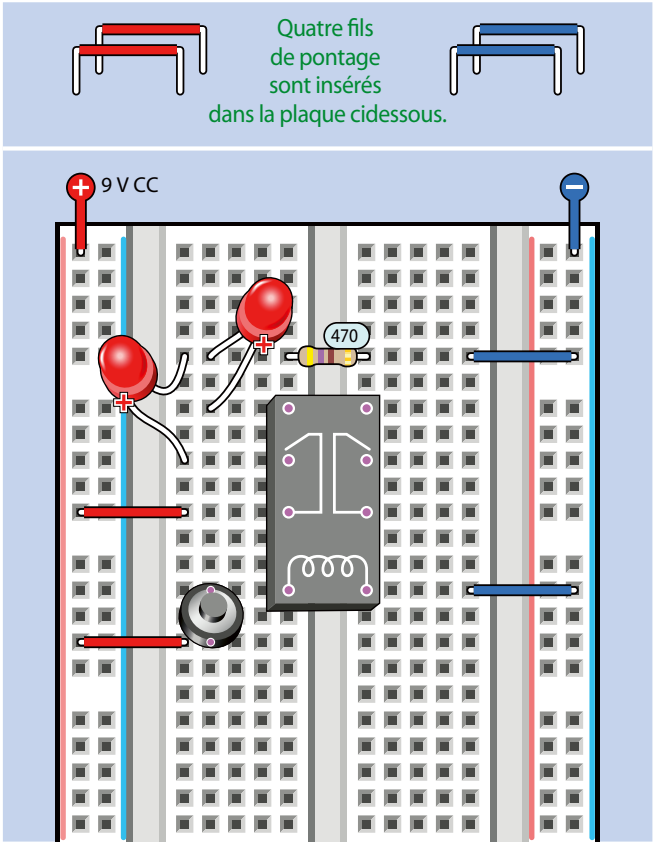


Figure 8-6. *Votre premier circuit sur une plaque de montage.*

Si vous avez des difficultés pour insérer un composant dans un montage selon la façon préconisée, vous pouvez le déplacer d'un espace à gauche ou à droite sur la plaque (s'il reste assez de place), car les fils feront toujours contact avec la même barrette horizontale.

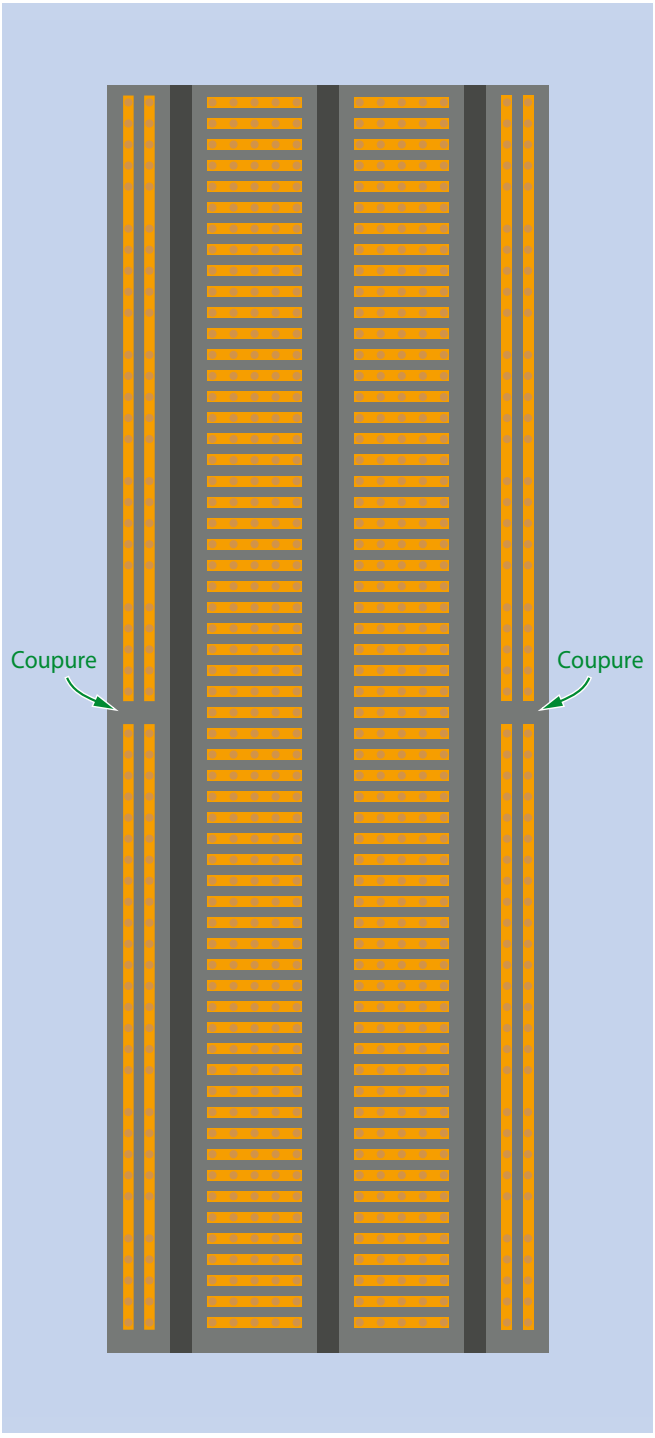


Figure 8-7. *Liaisons internes d'une plaque de montage.*

Vous pouvez remarquer que chaque bus est interrompu au centre de la plaque. Certaines plaques de montage ont cette option, d'autres ne l'ont pas. Son but est de pouvoir utiliser des sources d'alimentation différentes dans la partie haute et dans la partie basse d'une plaque. En pratique, vous n'en aurez pas besoin, de plus les séparations des bus sont ennuyeuses car vous pourriez oublier qu'elles existent. Si vous réalisez un circuit qui s'étend en bas de la plaque et que vous avez mystérieusement un manque de tension d'alimentation autour du repère central, vous réaliserez que vous avez oublié d'ajouter des fils de pontages pour relier les deux parties de chaque bus.

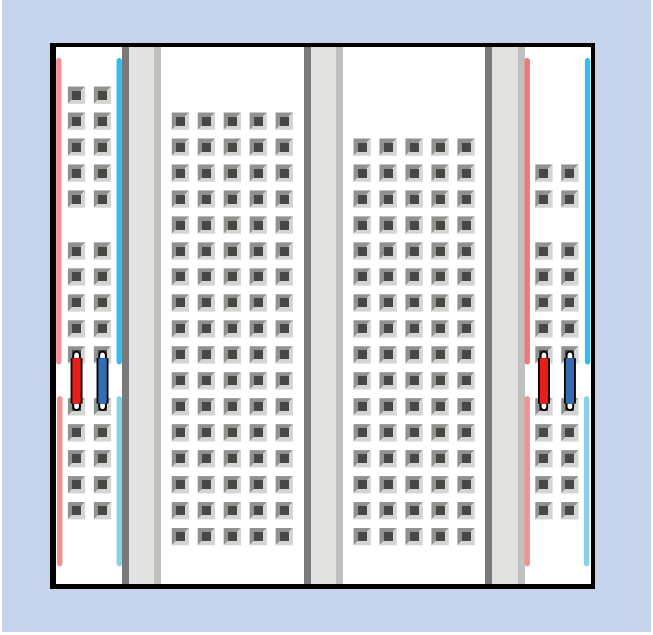


Figure 8-8. *Quand une plaque de montage a une coupure au milieu de ses bus, ajouter des fils de pontage comme sur la figure.*

Pour savoir si votre plaque de montage a ses bus interrompus, insérez un fil de pontage à chaque extrémité des coupures et utilisez votre multimètre pour vérifier la continuité des bus. Si cela est nécessaire, ajoutez les fils de pontage pour réunir les bus avant de commencer la réalisation de votre circuit. La figure 8-8 montre la partie centrale d'une plaque de montage avec les fils de pontage ajoutés.

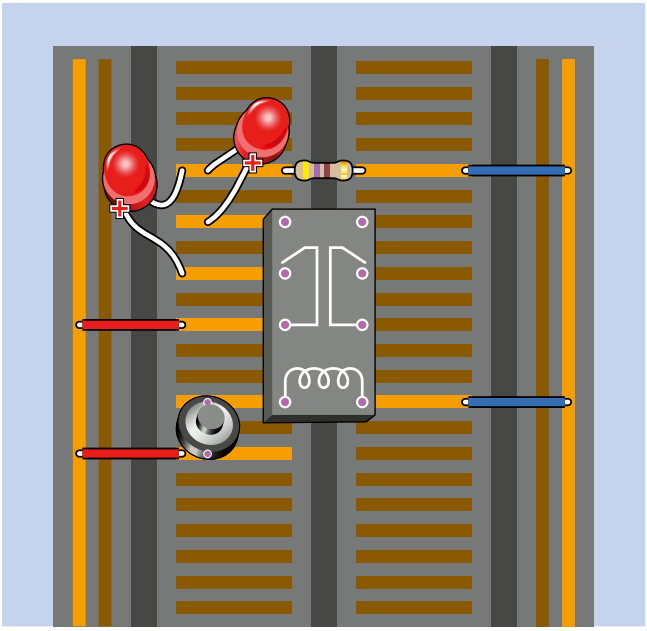


Figure 8-9. *Connexions entre les composants du circuit à relais. Les barrettes qui ne sont pas reliées sont de couleur sombre.*

Réalisation du circuit à relais

J'espère que la figure 8-9 vous aidera à comprendre comment ce circuit fonctionne, puisqu'elle vous montre la façon dont les composants sont interconnectés par les barrettes internes de la plaque. J'ai noirci les barrettes qui ne sont pas reliées aux composants et n'ont aucune utilité. Vous pouvez imaginer que le courant circule en zigzag en partant du bus positif, traversant les contacts du relais, de la LED et la résistance de 470 ohms pour rejoindre finalement le bus négatif. La résistance des barrettes est si faible que la longueur du chemin est sans importance.

Regardez maintenant le schéma du même circuit sur la figure 8-10. Je l'ai modifié afin qu'il ressemble le plus possible à la plaque de montage. À l'avenir, je vais me fier davantage aux schémas et fournir les plans de montage uniquement pour les circuits importants.

Vous pouvez voir comment le courant provenant du bus positif rejoint la LED de gauche en traversant les contacts du relais, même si l'interrupteur tactile n'active pas encore le relais. Au repos, les contacts sont dans cette position.

En plus d'avoir coloré les fils pour indiquer ceux qui sont à la tension de 9 V et ceux qui sont au niveau 0 V (masse), J'ai coloré les LED pour indiquer celle qui est allumée et laquelle est éteinte. Les fils entre les LED et la résistance sont noirs car leur tension se situera entre 0 V et 9 V, mais cette valeur n'est pas connue.

Observez maintenant la figure 8-11, le relais reçoit la tension de commande et active ses contacts, l'autre LED est alors allumée.

Si vous vous demandez pourquoi une seule résistance de 470 ohms protège deux LED, c'est parce qu'une seule LED est allumée à un instant donné.

Faisons vibrer le circuit

À l'étape suivante, vous allez modifier votre circuit pour le rendre plus intéressant. Regardez le schéma de la figure 8-12 et comparez-le avec le précédent. Pouvez-vous trouver les différences ? Dans la nouvelle version, le courant qui provient du bus doit faire un détour par les contacts du relais avant de rejoindre le bouton-poussoir qui peut activer la bobine du relais.

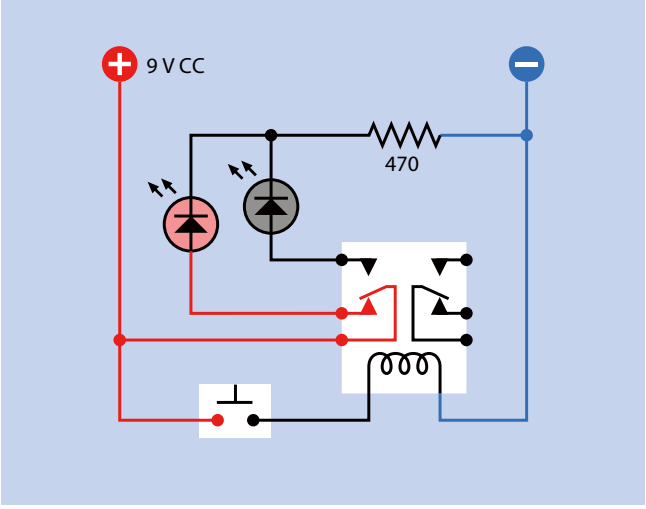


Figure 8-10. *Schéma du circuit à relais.*

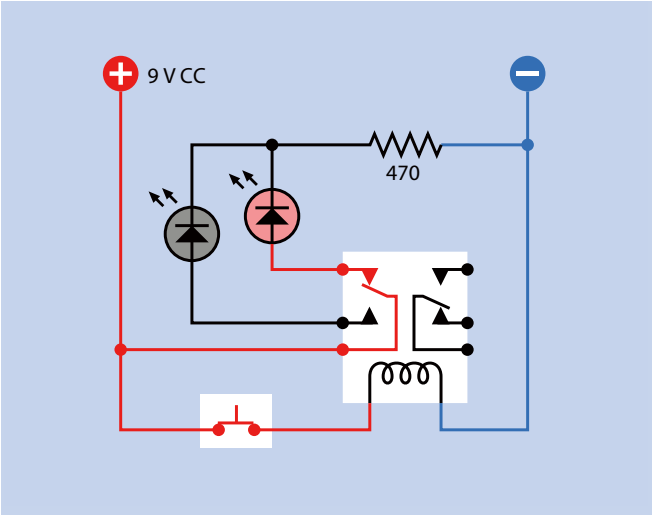


Figure 8-11. *Le relais est activé.*

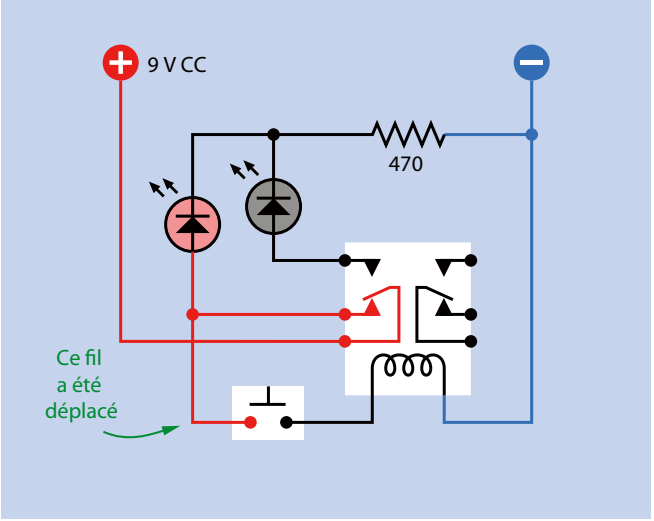


Figure 8-12. *Schéma modifié.*

Quel va en être la conséquence ? Essayez, et vous constaterez que le relais fait un bruit bizarre (si vous êtes malentendant, vous pouvez ressentir ses vibrations).

Le même circuit apparaît sur la figure 8-13. Le fil de pontage rouge alimente maintenant le contact commun du relais. Le courant passe au travers du contact au repos du relais et sort par la broche correspondante et rejoint le bouton-poussoir par le fil vert. Quand vous actionnez le bouton-poussoir, le relais est actionné et déplace ses contacts – mais attendez ! Quand les contacts s'ouvrent, le bouton-poussoir ne reçoit plus le courant, et le relais n'est plus activé, ses contacts se remettent au repos. Cela reconnecte le courant au bouton-poussoir et les contacts du relais sont à nouveau ouverts – et ainsi le cycle se répète. Le relais vibre entre ses deux états.

Du fait que vous utilisez un petit relais, il change d'état assez rapidement. En fait, il vibre environ 50 fois par seconde (trop rapidement pour que les LED puissent montrer ce qui se passe).

Quand vous forcez ainsi le comportement d'un relais, il peut se détériorer ou endommager ses contacts. Évitez de maintenir le bouton-poussoir appuyé trop longtemps. Pour rendre ce circuit moins destructeur, il faut que ce comportement soit plus lent, je vais y parvenir en utilisant un *condensateur*.

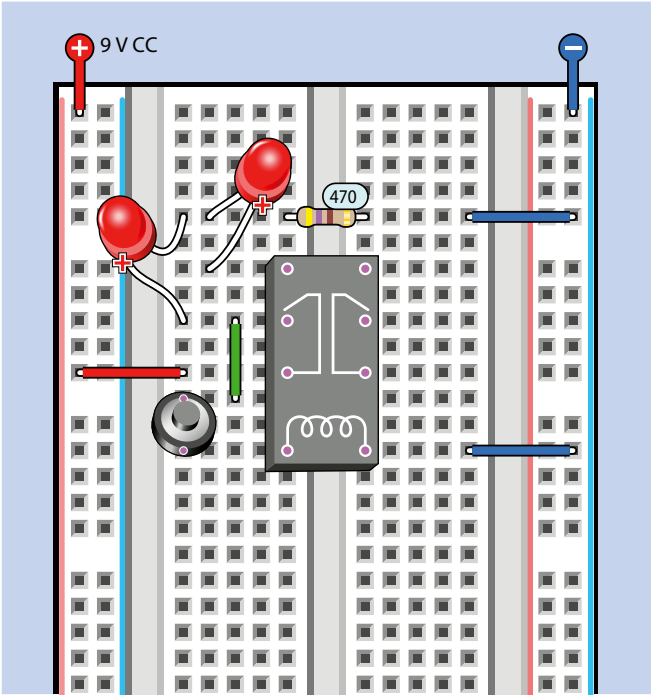


Figure 8-13. *Plan de montage de la version du schéma de la figure 8-12.*

Ajoutons un condensateur

Observez le plan de la figure 8-14, vous verrez que j'ai ajouté un nouveau composant en bas de la plaque de montage. Il s'agit d'un condensateur *électrochimique* de valeur 1 000 µF (mille microfarads). Je vais expliquer ces termes après vous avoir appris le rôle du condensateur.

Faites attention à bien relier le condensateur dans le sens indiqué, son fil négatif orienté vers le haut de la plaque de montage. Le fil en bas du condensateur est relié par un fil jaune à l'autre borne de la bobine. Dans cette configuration, on dit que le condensateur est connecté en *parallèle* à la bobine.

Votre condensateur possède des fils assez longs, il pourrait rejoindre la bobine sans devoir utiliser le fil de pontage jaune.

Lorsque vous pressez le bouton-poussoir, le relais devrait basculer plus lentement en émettant un bruit de claquement au lieu de vibrer, et les LED vont clignoter alternativement.

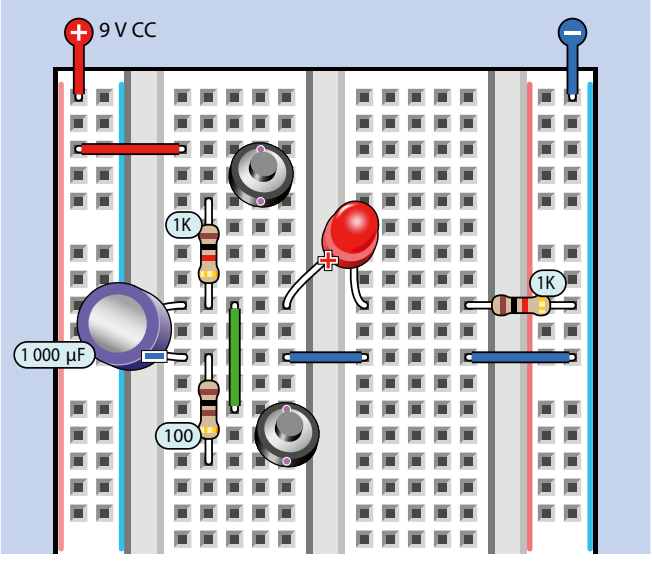


Figure 8-15. *Circuit montrant la charge et la décharge d'un condensateur.*

Un condensateur ressemble à une petite pile rechargeable. Il stocke la tension en une fraction de seconde, avant que le relais n'ait pu ouvrir ses contacts. Quand les contacts sont ouverts, le condensateur se décharge dans la bobine du relais (ainsi que dans la LED de gauche) et maintient ainsi le relais activé pendant un moment.

Le condensateur prélève une tension du circuit, puis il la restitue. Ce comportement est appelé *charge* et *décharge* du condensateur.

Fondamentaux : stockage d'une charge

Afin d'avoir une idée précise de ce qui se passe dans un condensateur, réalisez le circuit de la figure 8-15. Faites attention, le condensateur a été orienté de façon à ce que son fil négatif soit orienté vers la partie basse de la plaque de montage.

Appuyez sur le bouton-poussoir du bas pendant environ une seconde. Il est relié à la résistance de 100 ohms, puis l'ensemble est connecté en parallèle au condensateur. Quand vous appuyez sur ce bouton, toute charge sur un des fils du condensateur est neutralisée par la charge de l'autre extrémité. Il est donc déchargé.

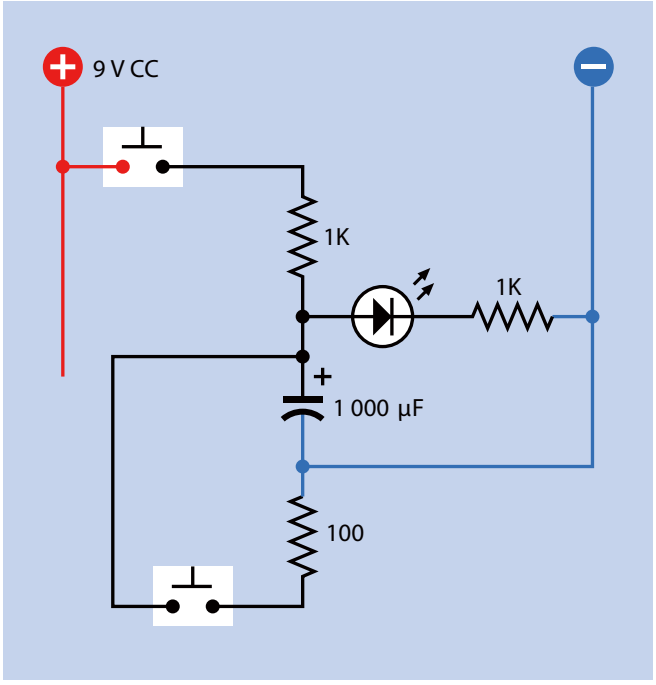


Figure 8-16. *Représentation schématique du circuit de la figure 8-15.*

Peut-être vous demandez-vous pourquoi la résistance est nécessaire ? Elle protège les contacts de l'interrupteur tactile de la soudaine pointe de courant, sachant qu'il est prévu pour couper une intensité de 50 mA.

Laissez le bouton-poussoir du bas revenir en position de repos. Appuyez maintenant sur le bouton du haut, la LED s'illumine lentement. Relâchez le bouton-poussoir, la LED s'éteint lentement. Si vous analysez le chemin parcouru par le courant, vous verrez que lorsque vous appuyez sur l'interrupteur du haut, le courant traverse la résistance de 1K avant de rejoindre le condensateur.

Le condensateur a une très faible résistance interne lorsqu'il commence à se charger. Il absorbe le courant, mais au fur et à mesure que la tension augmente à ses bornes, la LED en prend une partie véhiculée par la barrette interne de la plaque de montage. Cela se passe relativement lentement car la résistance de 1K réduit l'intensité du courant.

Une résistance en série avec un condensateur ralentit la charge de ce dernier.

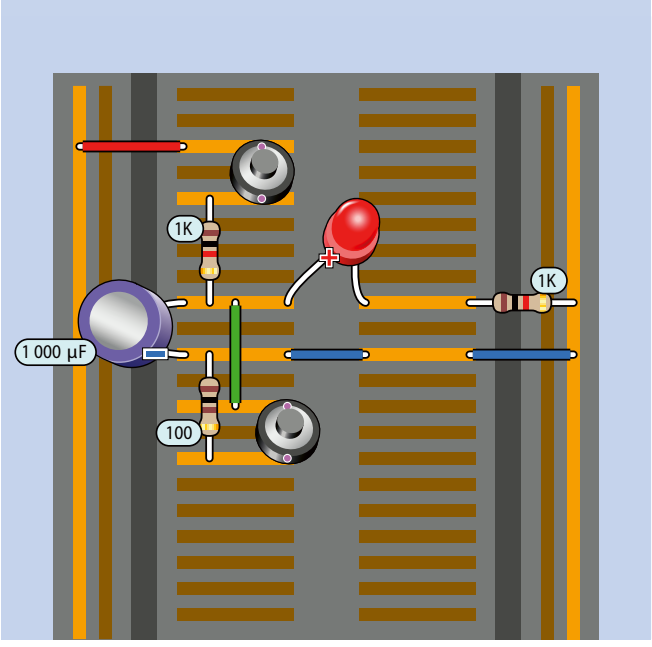


Figure 8-17. *Vue en transparence du circuit de la figure 8-15.*

Appuyez à nouveau sur le poussoir du bas, la LED s'éteint très rapidement car le condensateur préfère évacuer sa charge vers la masse (pôle négatif de l'alimentation) au travers de la résistance de 100 ohms, plutôt que par la LED.

Vous trouverez le schéma de ce circuit sur la figure 8-16, comprenant le nouveau symbole représentant le condensateur.

Vous trouverez également une vue en transparence de ce circuit sur la figure 8-17.

Voici quelques informations importantes concernant ce circuit très simple :

- Le fil négatif du condensateur doit être relié à la masse, sinon le circuit ne fonctionnera pas. Vous pouvez le vérifier en retirant le file de pontage bleu situé au centre de la plaque.
- Quand une résistance et un condensateur sont reliés en série, on dit qu'il s'agit d'un *réseau RC* (réseau à résistance et condensateur).
- Plus la résistance sera élevée, plus le condensateur se chargera lentement. Vous pouvez le vérifier en remplaçant la résistance de 100 ohms par une résistance de 1K.
- Plus la valeur du condensateur sera élevée, plus le condensateur se chargera lentement. Si vous ne disposez pas d'un condensateur de valeur supérieure à 1 000 µF, remplacez-le par un condensateur de plus petite valeur, vous constaterez que la LED s'allume et s'éteint plus rapidement.
- Le type de condensateur utilisé contient deux films d'aluminium très fins, séparés par un isolant et enroulés ensemble, chacun étant relié à l'un des fils du condensateur. Les films d'aluminium sont souvent appelés *plaques*, car les premiers condensateurs étaient constitués de deux plaques métalliques séparées par un très petit espace.
- Lorsqu'une des plaques est reliée à une tension positive, elle attire les charges négatives de l'autre plaque, c'est pour cela que l'on doit la relier à la masse. Les fils bleus assurent le passage des électrons.

Le concept de l'attraction des charges opposées est illustré sur la figure 8-18.

Un condensateur conserve sa charge quand vous le déconnectez d'un circuit, toutefois son isolant interne n'est pas parfait et permet une faible fuite des charges entre les deux plaques.

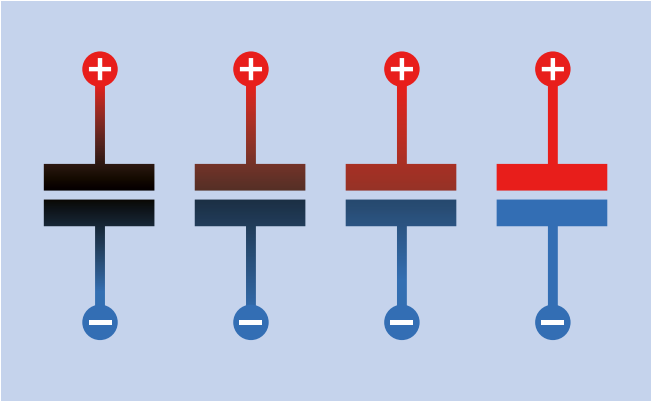


Figure 8-18. *Charge progressive d'un condensateur en quatre vues temporelles.*

Fondamentaux : la capacité

La capacité de stockage d'un condensateur est exprimée en *farads*, représentés par la lettre majuscule F. Cette unité a été ainsi nommée en hommage à Michael Faraday, un autre pionnier de l'électricité.

Les condensateurs ayant une forte capacité exprimée en farads sont difficiles à produire et très couteux. Heureusement, leur usage est très limité dans les circuits électroniques modernes. Les circuits contiennent en général des condensateurs dont les valeurs sont exprimées en microfarads, en nanofarads ou en picofarads. Du plus petit au plus élevé :

```
1000 picofarads (pF) = 1 nanofarad (nF)

1000 nanofarads (nF) = 1 microfarad (µF)

1000000 microfarads (µF) = 1 farad (F)
```

La figure 8-19 résume cela.

Qu'en est-il des millifarads ? Existent-ils ? Ils le devraient ! Après tout, nous avons bien des milliampères et des millivolts ! Aurions-nous 1 000 microfarads dans un millifarad ? La réponse à ces questions est « oui » et l'abréviation mF est alors utilisée, mais très rarement. Une des raisons tient au fait que mF pourrait facilement être interprété « microfarad ». Vous n'aurez pas souvent l'occasion de voir des valeurs exprimées en « mF ».

Picofarads	Nanofarads	Microfarads	Farads
1 pF	0,001 nF	0,000001 µF	
10 pF	0,01 nF	0,00001 µF	
100 pF	0,1 nF	0,0001 µF	
1 000 pF	1 nF	0,001 µF	
10 000 pF	10 nF	0,01 µF	
100 000 pF	100 nF	0,1 µF	
1 000 000 pF	1000 nF	1 µF	0,000001 F
		10 µF	0,00001 F
		100 µF	0,0001 F
		1 000 µF	0,001 F
		10 000 µF	0,01 F
		100 000 µF	0,1 F
		1 000 000 µF	1 F

Figure 8-19. *Tableau de conversion des fractions de farads.*

Les condensateurs couramment utilisés dans l'électronique de faible puissance ont une valeur comprise entre 0,1 nF (c'est-à-dire 0,0001 µF) et 1 000 µF. Les condensateurs de plus faibles valeurs utilisent habituellement les multiples que j'ai évoqués au sujet des résistances : 1,0 ; 1,5 ; 2,2 ; 3,3 ; 4,7 et 6,8.

Vous devez connaître la signification de picofarad, nanofarad et microfarad. Pour convertir de pF en nF, déplacez la virgule de trois rangs vers la gauche.

Pour passer de nF à µF, déplacez à nouveau la virgule de trois rangs vers la gauche.

Pour passer de µF à nF, ajoutez trois zéros. Pour convertir une valeur de nF à pF, ajoutez également trois zéros. Ceci est résumé sur la figure 8-19.

Référence : les condensateurs

Voici quelques informations auxquelles vous pourrez vous référer ultérieurement.

Il existe de nombreux types de condensateurs, mais les plus communs sont les condensateurs en *céramique* et les condensateurs *électrochimiques* (parfois appelés électrolytiques). Ce sont ceux qui sont utilisés dans ce livre.

Les *condensateurs en céramique* ressemblent à des petits disques ou des gouttes comme à droite sur la figure 6-25. Ils sont souvent de couleur beige ou bleue, et portent des valeurs en général inférieures à 1 µF. Ils ne sont pas polarisés, vous pouvez donc les connecter dans n'importe quel sens.

Les *condensateurs électrochimiques* ont un boîtier cylindrique en aluminium enrobé d'un film en plastique de couleur quelconque, comme celui de gauche, sur la figure 6-25. Leurs valeurs sont généralement supérieures à 1 µF et ils sont moins coûteux que les condensateurs en céramique. Ils sont polarisés et doivent être connectés en respectant cette caractéristique. Leur pôle négatif est indiqué sur leur boîtier et leur fil de connexion négatif est généralement plus court que l'autre (positif).

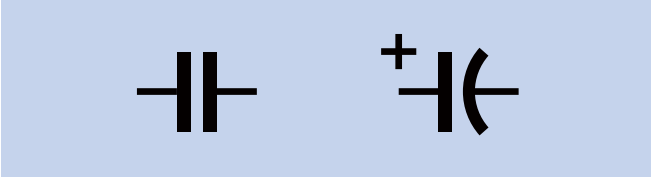


Figure 8-20. *Symboles des condensateurs. Consultez le texte pour plus de détails.*

Le symbole de schématique des condensateurs possède deux variantes que montre la figure 8-20. Le symbole avec deux traits droits est le symbole représentant n'importe quel condensateur, les deux traits symbolisant les plaques du condensateur. La variante à droite constituée d'un trait droit et d'un trait courbe représente un condensateur polarisé, le trait courbe correspondant au pôle négatif du condensateur. Il comprend toujours le signe plus (+) indiquant le pôle positif, mais parfois certains dessinateurs l'oublient. Parfois, d'autres dessinateurs utilisent le symbole général pour désigner un condensateur électrochimique, c'est alors à vous de déterminer où se situe le « pôle le plus positif ».

Voici une règle générale concernant l'utilisation des condensateurs :

- Un condensateur en céramique pouvant être connecté dans n'importe quel sens, à valeur identique, vous pouvez toujours en utiliser un au lieu d'un condensateur électrochimique.
- Si un circuit est conçu pour faire circuler un courant dans n'importe quel sens dans un condensateur, évitez d'utiliser un condensateur électrochimique.
- Il existe des condensateurs électrochimiques non polarisés, mais leur usage est rare. Ils sont constitués de deux condensateurs électrochimiques reliés en série leurs polarités étant opposées.

En observant le schéma de la figure 8-16, vous remarquerez qu'il est évident de déterminer quel fil du condensateur est plus positif que l'autre car l'un d'entre eux est relié à la masse. Dans ce livre, je mentionne toujours la polarité partout où une clarification est nécessaire.

Fondamentaux : blocage d'une tension continue

Vous avez vu qu'un condensateur peut stocker et restituer une charge électrique. Ce n'est toutefois pas la même chose que de permettre au courant de le traverser. En fait, d'une façon générale, un condensateur bloquera le passage du courant continu (CC), car ses plaques internes ne se touchent pas.

Vous pouvez faire une expérience très simple pour le vérifier. Réglez votre multimètre pour la mesure des intensités en mA, reliez-le en série avec une résistance de 10K et un condensateur en céramique de 1 µF. Appliquez une tension de 9 V entre les deux extrémités de ce circuit, aucun courant ne devrait être mesurable. Déconnectez le condensateur et reconnectez-le dans l'autre sens. Le courant sera toujours nul. Un condensateur en céramique n'a pas de polarité.

Vous pouvez réessayer avec un condensateur électrochimique de 1 000 µF. Reliez-le en série à une résistance de 10K et à votre multimètre. Si la polarité du condensateur est correcte, le courant mesuré par le multimètre devrait être quasiment nul car le condensateur bloque le courant continu. Inversez maintenant le sens du condensateur, votre multimètre devrait alors vous indiquer que le condensateur laisse passer le courant.

Un condensateur électrochimique bloque le courant continu quand il est utilisé correctement, si vous le connectez dans le mauvais sens, il présente une résistance assez faible.

Que se passerait-il si vous retiriez votre multimètre et la résistance de protection de 10K pour appliquer directement la tension au condensateur avec la mauvaise polarité ? Ce n'est pas une bonne idée ! En effet, le condensateur serait définitivement endommagé et pourrait même chauffer suffisamment rapidement, au point de provoquer la rupture de son boîtier.

Les condensateurs électrochimiques ne sont pas les seuls condensateurs nécessitant le respect de leur polarité, les condensateurs au *tantale* sont exigeants quant au respect de leur polarité. Vous devez être prudent, rappelez-vous que leur polarité est indiquée par le signe +, certains ne le remarquent pas. Des gens comme moi par exemple.

La figure 8-21 montre ce qui se passe après avoir connecté un condensateur au tantale dans le mauvais sens à une alimentation capable de délivrer un courant substantiel. Après quelques secondes, le condensateur a explosé comme un petit pétard et répandu des petits morceaux brillants, certains terminant leur course en brûlant la plaque de montage. La leçon est claire ! Respectez la polarité !

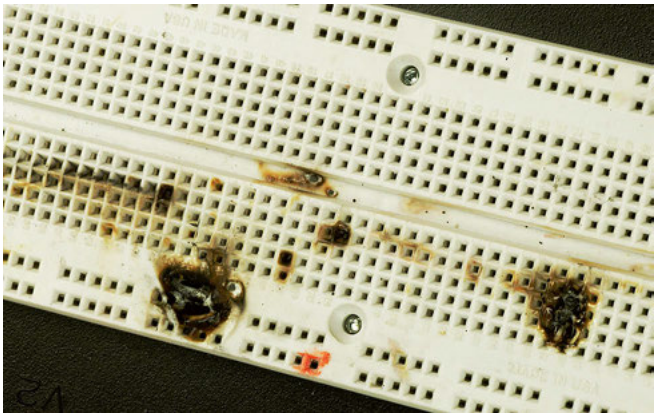


Figure 8-21. *Plaque de montage endommagée par l'explosion d'un condensateur au tantale.*

Historique : Michael Faraday et les condensateurs

Le farad fut choisi après que Michael Faraday a découvert que lorsque deux plaques métalliques sont parallèles entre elles et très rapprochées, une charge appliquée à une plaque attire la charge de l'autre plaque. Michael Faraday (figure 8-22) était chimiste et physicien anglais, il vécut de 1791 à 1867.

Malgré une éducation primaire et des connaissances en mathématiques réduites, il lisait de très nombreux livres pendant son apprentissage du métier de relieur, cela lui a permis de s'instruire en autodidacte. Rappelons qu'au XIX^{e} siècle, les propriétés fondamentales de l'électricité pouvaient être mises en évidence par des expériences relativement simples. Il est l'auteur de découvertes majeures, comme l'induction électromagnétique, qui a permis le développement des moteurs électriques. Il a également constaté que le magnétisme avait une influence sur les rayons lumineux.

Ses travaux lui ont valu de nombreuses distinctions et, entre 1991 et 2001, son portrait était imprimé sur les billets de 20 £.

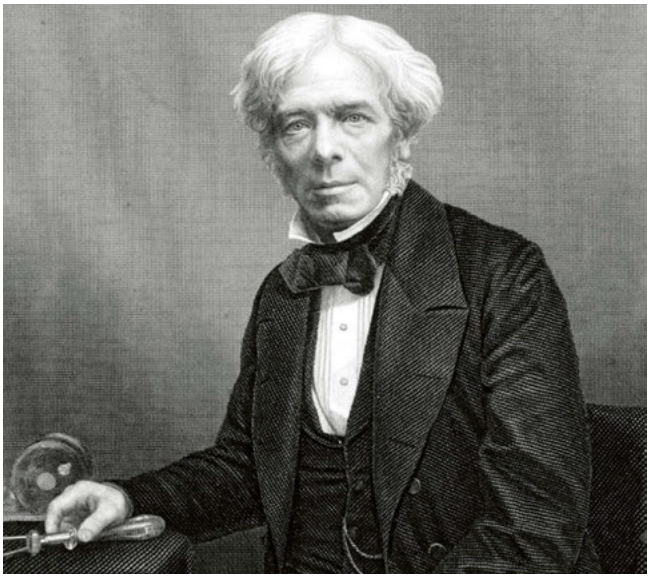


Figure 8-22. *Michael Faraday, qui a donné son nom au farad.*

Lecture de la valeur des condensateurs électrochimiques

La valeur des condensateurs électrochimiques est inscrite sur leur corps ainsi que leur tension de fonctionnement

qui est le maximum que le condensateur tolèrera de façon fiable. Cette notion est très importante, car l'isolant interne d'un condensateur est très fin et peut se rompre s'il est soumis à une tension excessive.

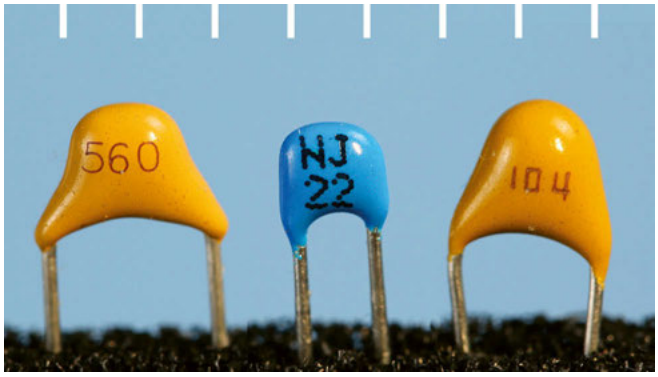


Figure 8-23. *Les condensateurs en céramique récents ont une forme arrondie. Les graduations d'échelle sont espacées de 2,54 mm.*

Un condensateur peut néanmoins être utilisé sous une tension plus faible que sa tension nominale de fonctionnement.

Vraiment ? Y a-t-il des limites à cette affirmation ? Supposons que vous ayez un condensateur prévu pour fonctionner sous une tension de 250 volts ; peut-on l'utiliser dans un circuit alimenté par une tension de 5 V ? Oui, c'est possible. Une tension nominale plus élevée aura pour conséquence des dimensions plus importantes du composant et son prix sera probablement plus élevé. Il fonctionnera toujours avec une tension inférieure.

Lecture de la valeur des condensateurs en céramique

Les condensateurs en céramique récents comportent de multiples plaques microscopiques entrelacées. La figure 8-23 montre quelques condensateurs en céramique. De gauche à droite, il s'agit de condensateurs de 56 pF, 22 pF, et 100 000 pF (0,1 microfarad). Les traits de l'échelle en haut sont espacés de 2,54 mm.

Au XX^{e} siècle, les condensateurs en forme de disques étaient plus courants. La figure 8-24 en montre deux exemplaires. À gauche, 1 500 pF (1,5 nF), à droite : 47 pF avec une tolérance de 20 % et une tension maximum de 1 kV. Les traits de l'échelle en haut sont espacés de 5,08 mm.

Comme vous pouvez le remarquer, les condensateurs en céramique ont habituellement un code imprimé sur leur corps. Voici comment le lire :

Les deux premiers chiffres : début de la valeur du condensateur.

Troisième chiffre : nombre de zéros ajoutés.

Il peut également y avoir une lettre à la fin, indiquant la tolérance du condensateur. Voici un résumé des exemples que vous pourriez rencontrer.

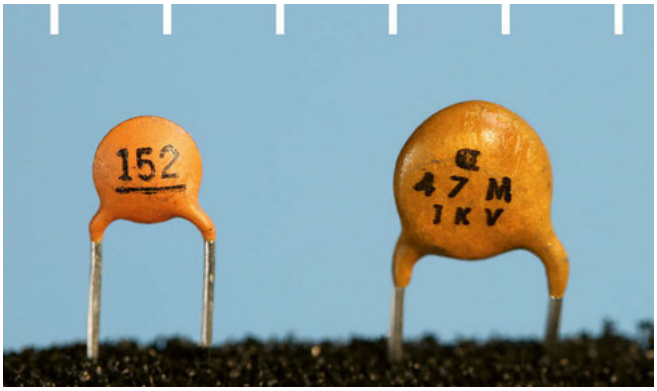


Figure 8-24. *Deux condensateurs anciens en forme de disque. Les divisions de l'échelle sont espacées de 5,08 mm.*

`J` signifie 5 %

`K` signifie 10 %

`L` signifie 15 %

`M` signifie 20 %

La première paire de chiffres est toujours en picofarads, ainsi, si vous avez un condensateur en céramique marqué 473M, sa valeur est de 47 000 pF (47 suivi de trois zéros) avec une tolérance de 20 %.

Rappelez-vous que pour convertir des petites unités en unités plus élevées, il faut déplacer la virgule de trois rangs vers la gauche : 47 000 pF est équivalent à 47 nF, qui est identique à 0,047 µF.

Voici un autre exemple. Supposons que vous ayez un condensateur en céramique identifié par 685K. Sa valeur est 68 suivie de 5 zéros, soit 6 800 000 pF. C'est équivalent à 6 800 nF ou 6,8 µF. C'est une valeur élevée pour un condensateur céramique, mais il en existe. Sur ces condensateurs, la lettre K ne signifie pas kilo mais indique la tolérance de 10 %, sauf si elle est séparée de la valeur et suivie de la lettre V, auquel cas cela signifie kV (kilovolts) pour indiquer la tension de service admissible.

Si le code est uniquement constitué de deux chiffres, par exemple 22, cela indique une valeur en picofarads (22 pF), comme le condensateur de la figure 8-23.

Comment connaître la tension de service ? Souvent elle n'est pas indiquée et vous devez vous référer aux données du fabricant qui peuvent vous l'indiquer. Lorsque vous achetez des petits composants, ils sont souvent fournis dans des petits sacs en plastique comportant une étiquette, vous pouvez stocker vos composants de cette façon. Vous pouvez également les ranger dans des petites boîtes comme celle de la figure 24-3, il faudra ajouter vos propres étiquettes pour les repérer. Ma solution de rangement de mes condensateurs est montrée figure 24-7.

Si vous retirez un condensateur en céramique de son boîtier de rangement et que vous oubliez sa tension de service, vous avez un problème. Heureusement, la plupart sont prévus pour une tension de 25 V CC, voire davantage (contrairement aux condensateurs électrochimiques qui peuvent être prévus pour une tension aussi faible que 5 V CC). En consultant certains fournisseurs, je me suis rendu compte qu'à peine 1 % des condensateurs en céramique avaient une tension de service inférieure à 25 V CC. Vous n'avez donc pas à vous soucier de leur tension de service.

Attention : risque de choc électrique

Si un condensateur de forte valeur est chargé par une tension élevée, il peut conserver cette tension pendant plusieurs minutes, voire des heures. Les circuits de ce livre ne mettant que des tensions faibles en œuvre, vous n'êtes pas concerné par ce danger. Mais si vous êtes assez téméraire pour ouvrir un appareil ancien qui utilise des tensions élevées (comme une ancienne télévision à écran cathodique), vous pourriez avoir une surprise qui pourrait vous être fatale. Sérieusement, si vous travaillez sur une ancienne TV, ne vous aventurez pas à l'intérieur, car même débranchée, les tensions rémanentes peuvent être létales.

Expérience 9
Le temps et les condensateurs

Cette expérience va mettre en évidence la relation entre les condensateurs et le temps. Je vais également vous montrer comment un condensateur peut être utilisé pour filtrer le courant électrique. Vous verrez enfin le phénomène mystérieux du *couplage capacitif*.

Vous aurez besoin de :

- 1 pile de 9 V relativement neuve (tension d'au moins 9,1 V)
- 1 plaque de montage, du fil de câblage, pince coupante, pince à dénuder, fils de tests et votre multimètre comme précédemment
- 2 interrupteurs tactiles
- 1 LED générique rouge
- résistances : 100 ohms (2), 470 ohms (1)
- condensateurs électrochimiques : 100 µF (1), 1 000 µF (1)

L'intérieur d'un condensateur

Commencez par régler votre multimètre pour mesurer une tension et vérifiez la tension de votre pile de 9 V, puis notez sa valeur car vous devrez vous y référer ultérieurement. Pour cette expérience, la tension de votre pile doit être au moins égale à 9,1 V. Si ce n'est pas le cas, vous devez utiliser une pile neuve.

Le circuit de la figure 8-15 vous a permis d'avoir une introduction rapide au comportement d'un réseau RC, maintenant, je souhaite que vous compreniez exactement comment un condensateur se charge et se décharge. Pour cela vous utiliserez un multimètre au lieu d'une LED, vous devez donc commencer par retirer la LED et sa résistance en série. Votre nouveau circuit devrait ressembler à celui de la figure 9-1. Remarquez les nouveaux éléments :

- La tension de la pile doit être de 9,1 V ou plus.
- Un second interrupteur tactile a été ajouté.
- Deux fils de pontage jaunes ont leurs extrémités inférieures pliées vers l'extérieur et sont accessibles afin que vous puissiez relier les cordons de mesure de votre multimètre, afin de mesurer la tension aux bornes du condensateur.

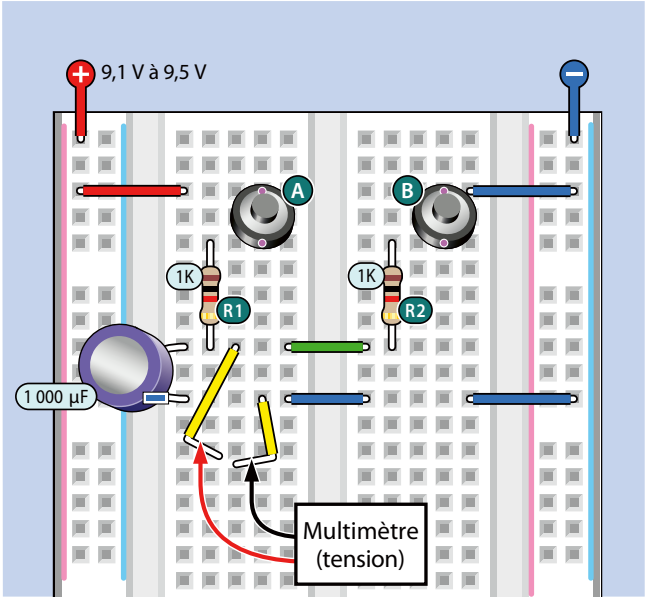


Figure 9-1. *Circuit pour étudier la charge et la décharge d'un condensateur.*

J'ai identifié les deux interrupteurs tactiles A et B, et les deux résistances R1 et R2 afin de pouvoir m'y référer facilement. Voici quelques règles générales concernant les plans des plaques de montage dans la suite de ce livre :

- Quand vous verrez un texte en blanc dans une bulle, c'est une notation que j'utiliserai pour indiquer à quel composant je me réfère. Cette notation n'a aucun rapport avec la valeur du composant (comme le nombre d'ohms d'une résistance).
- Les valeurs des composants seront toujours indiquées en noir sur fond bleu ciel, afin de les différencier de la notation précédente. Dans la suite de ce livre, quand de

nombreux composants seront présents sur une plaque de montage, j'en dresserai la liste en bas des plans.

- Dans les schémas qui sont visuellement plus simples, les références et les valeurs seront indiquées en caractères noirs.

Prêt pour l'expérience ? Commencez par mettre en contact les deux extrémités libres des fils jaunes afin de vous assurer que le condensateur est totalement déchargé. Ensuite, vous les séparez puis reliez les fils de votre multimètre en utilisant des fils de tests avec les pinces crocodiles si vous en possédez. Le multimètre devrait indiquer 0 V.

Vous devrez mesurer la durée du processus de charge en utilisant votre téléphone, un chronomètre, ou une montre affichant les secondes. Démarrez votre chronomètre en maintenant simultanément appuyé le bouton-poussoir A. Combien de temps a mis le condensateur pour atteindre la tension de 9 V ?

Quand j'ai fait cette expérience, mon multimètre a indiqué 9 V au bout de 3 secondes.

Remplacez R1 par une résistance de 10K au lieu de 1K, puis recommencez le test.

- Le condensateur a-t-il mis dix fois plus de temps pour atteindre la tension de 9 V quand vous avez utilisé la résistance de 10K ?
- Est-ce que la tension aux bornes du condensateur a évolué de façon régulière, ou bien est-ce qu'elle a augmenté de façon plus rapide au début qu'à la fin de la charge ?
- En attendant suffisamment longtemps, la tension aux bornes du condensateur a-t-elle atteint la valeur précédemment mesurée de la tension de votre pile ?
- Quand vous relâchez le bouton A en continuant de mesurer la tension du condensateur avec votre multimètre, la tension diminue-t-elle très lentement ?
- Remplacez la résistance R2 par une résistance de 10K. Quand vous maintenez le bouton B, le condensateur se décharge-t-il à la même vitesse que quand il se chargeait ?

Je vais vous montrer comment répondre à ces questions.

Tension, résistance et capacité

Imaginez que R1 soit un robinet contrôlant le débit de l'eau et le condensateur un ballon que vous essayez de remplir, comme sur la figure 9-2. Quand vous refermez le robinet jusqu'à ce qu'un petit filet d'eau en sorte, c'est similaire à l'augmentation de la valeur de la résistance dans un circuit, le ballon va mettre davantage de temps à se remplir.

Au début, la pression dans le tuyau est supérieure à la pression interne du ballon. En conséquence, l'eau remplit le ballon rapidement, mais alors que ce processus continue, le caoutchouc du ballon se tend et la pression interne augmente. Cette pression freine l'écoulement du robinet, et l'eau cesse de couler quand la pression à l'intérieur du ballon atteint celle du tuyau, pour autant que le ballon n'explose pas.

La situation à l'intérieur d'un condensateur est identique. Initialement, les électrons se précipitent, mais alors que la tension augmente, les nouveaux arrivants ont besoin de plus de temps pour trouver place. Le processus de charge ralentit de plus en plus. Théoriquement, la charge du condensateur n'atteint jamais la valeur de la tension qu'on lui applique.

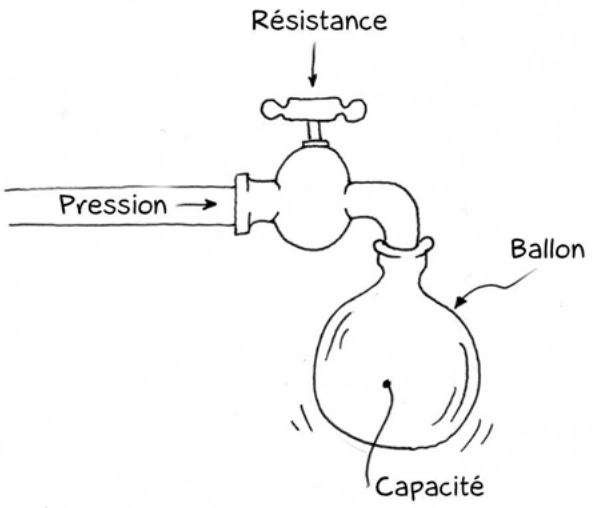


Figure 9-2. *L'eau s'écoulant dans un ballon peut se comparer à un courant électrique s'écoulant dans un condensateur.*

Fondamentaux : la constante de temps

La vitesse de charge d'un condensateur se mesure par une quantité appelée *constante de temps*. La définition est très simple. Supposez que vous ayez un condensateur de F farads, se chargeant au travers d'une résistance de R ohms, la constante de temps TC est calculée ainsi :

```
TC = R * F
```

Figure 9-3. *Ce gourmand affamé emplit son estomac comme s'il s'agissait d'un condensateur.*

Le circuit de la figure 9-1 chargeait un condensateur de 1 000 µF au travers d'une résistance de 1K. Je peux introduire ces valeurs dans la formule, il me faut toutefois les convertir en ohms et farads. C'est assez facile puisque 1K c'est 1 000 ohms, et 1 000 µF c'est 0,001 farad. La formule devient :

```
TC = 1000 * 0,001 = 1
```

En effet, c'est aussi simple que cela. Pour la résistance et le condensateur que vous avez utilisés, TC = 1.

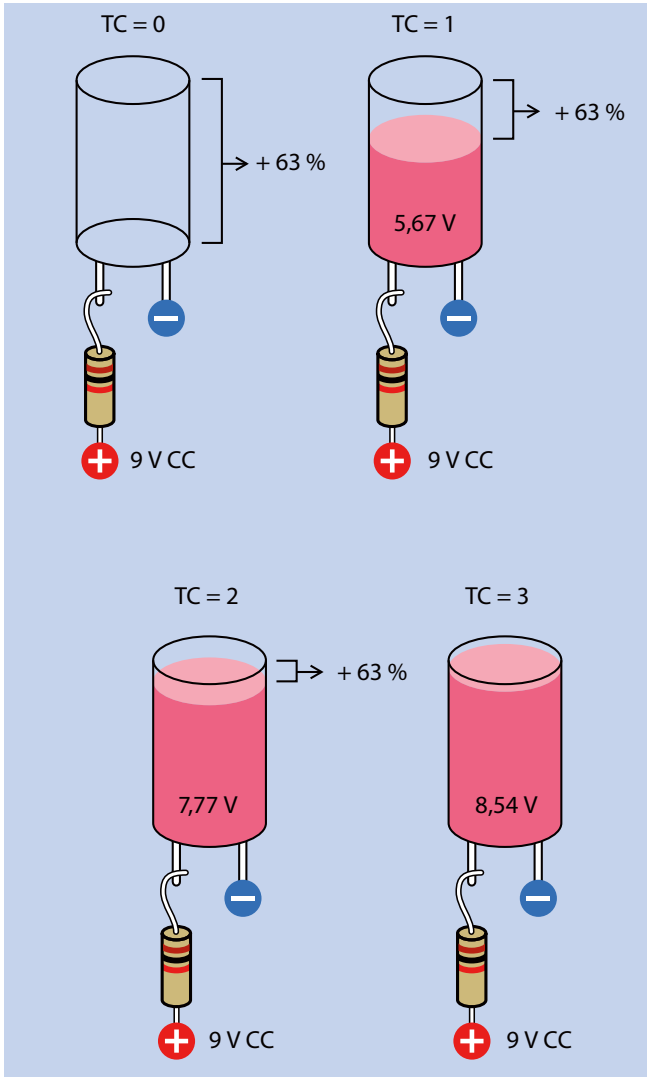


Figure 9-4. *Comparaison d'un condensateur à un cylindre de liquide.*

Que cela signifie-t-il exactement ? Est-ce que cela veut dire que le condensateur sera totalement chargé en 1 seconde ? Non, ça serait trop facile, et votre expérience a démontré que cela ne se passait pas aussi rapidement. Voici la définition de TC la constante de temps :

> *TC est le nombre de secondes nécessaires à un condensateur pour acquérir 63 % de la tension qui lui est appliquée (en supposant que le processus parte d'une tension nulle).*

Pourquoi 63 % ? Pourquoi pas 62 %, ou 64 %, ou même 50 % ? La réponse précise à cette question est un peu technique. Je vais vous montrer comment cela se passe, mais si vous voulez comprendre comment cela fonctionne, faites une recherche internet pour : « `constante de temps d'un circuit RC` ».

Les figures 9-3 et 9-4 proposent deux façons de l'imaginer. Sur la figure 9-3, cet individu cupide voulant remplir son estomac de gâteau est comparable à un condensateur voulant se remplir d'électrons.

Au début, ce vorace est très affamé, il mange 63 % du gâteau en une seconde, ce qui est sa constante de temps pour manger un gâteau. Dans un deuxième temps, il ralentit un peu car il a maintenant moins faim. Il mange alors 63 % des restes du gâteau, ce qui lui demande une seconde de plus. Ensuite, il mange 63 % de ce qui reste du gâteau en une seconde et ainsi de suite. Petit à petit, il remplit son estomac de gâteau mais ne parvient jamais à manger tout le gâteau car à chaque fois il ne mange que 63 % de ce qui reste.

Sur la figure 9-4, j'ai représenté un condensateur d'une manière différente, comme si c'était un réservoir cylindrique se remplissant d'un liquide de couleur rose. Au bout de chaque constante de temps, (qui est, vous vous rappelez, de 1 seconde pour un condensateur de 1 000 µF et une résistance de 1K), le condensateur accumule 63 % de la différence entre la tension qu'il possède et celle qui lui est appliquée.

Ainsi, en théorie, le processus de charge d'un condensateur peut durer indéfiniment, cependant, il existe une règle d'or :

> *Après 5 constantes de temps, la charge est si proche de 100 % que l'on considère que le processus est terminé.*

Si vous préférez voir ceci sous forme d'un graphique, la figure 9-5 montre l'accroissement de la tension aux bornes d'un condensateur en fonction du temps. J'ai calculé les points de la courbe en utilisant la formule de la constante de temps TC.

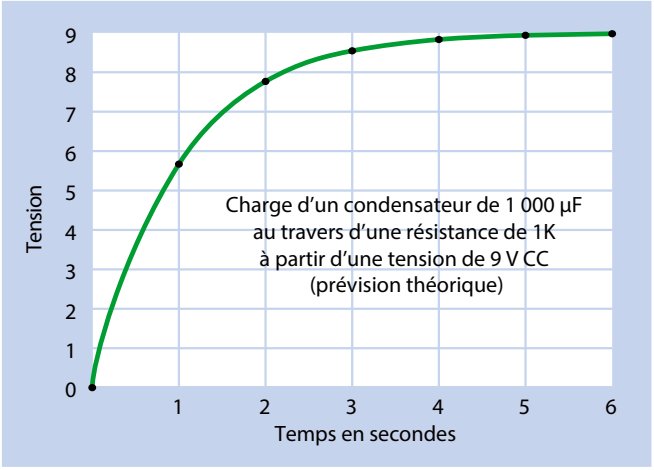


Figure 9-5. *Représentation graphique de la charge d'un condensateur en fonction du temps.*

Je n'attends de personne de se rappeler exactement de la valeur de la tension aux bornes d'un condensateur durant sa charge, mais vous devez vous rappeler de ceci :

- Si vous réduisez la valeur de la résistance, ou celle du condensateur, le processus de charge sera plus rapide.
- Si vous augmentez la valeur de la résistance ou celle du condensateur, le processus de charge sera plus lent.

Vérification de la constante de temps

Vous pouvez vérifier par vous-même la validité de mes chiffres. C'est toujours une bonne idée, et c'est facile.

Revenez à la figure 9-1, utilisez deux résistances de 10K pour R1 et R2, vous aurez ainsi du temps pour prendre des notes durant les processus de charge et de décharge.

Déchargez le condensateur en reliant les deux fils de tests jaunes, puis commencez le chronométrage du processus de charge tout en appuyant simultanément sur le bouton A. Notez la tension toutes les 10 secondes pendant 1 minute.

Ce sera plus facile si un ami fait le chronométrage pendant que vous inscrivez les valeurs.

Rappelez-vous, TC est égal à la valeur du condensateur multipliée par la valeur de la résistance en farads et ohms. Vous utilisez maintenant des résistances de 10K au lieu de 1K, TC est donc 10 fois plus élevé. Comme vous ne notez que les tensions, votre série de valeurs doit être identique à celle que j'ai représentée pour des intervalles de temps de 1 seconde.

Vous pouvez également mesurer le temps nécessaire au condensateur pour se décharger au travers de R2 lorsque vous maintenez appuyé le bouton B. Il devrait être identique au temps pris par le condensateur pour se charger par le bouton A.

Comme rien n'est précis en électronique, voici certains facteurs qui peuvent rendre vos valeurs différentes des miennes :

- Votre batterie, les résistances et le condensateur peuvent être différents des miens.
- Votre multimètre n'est pas totalement précis et il vous faut quelques microsecondes pour faire la lecture.
- Les condensateurs sont imparfaits et ont des fuites qui leur font perdre un peu de leur tension pendant le processus de charge.
- Votre multimètre a une résistance interne qui est très haute, mais il absorbe un peu de la charge de votre condensateur. C'est pourquoi la tension mesurée va diminuer très lentement si vous le laissez relié aux fils jaunes sans appuyer sur aucun des boutons.

Arrivé à ce point, je pense que vous serez d'accord avec cette règle générale :

- Le processus de mesure d'une valeur influence la valeur que l'on mesure.

Pouvez-vous construire un temporisateur ?

Voici l'idée : au lieu d'utiliser une montre pour mesurer le temps nécessaire pour charger un condensateur, vous pourriez charger un condensateur pour mesurer le temps. Quand le condensateur atteint une tension donnée, il pourrait allumer une LED, le circuit fonctionnerait alors comme un minuteur.

Avez-vous une idée pour le faire ? Vous aurez besoin d'un composant additionnel que je vais présenter dans l'expérience 10. À la fin de l'expérience, je vous montrerai un minuteur très simple.

En attendant, il y a quelques compléments que vous devez connaître au sujet des condensateurs. Ils sont tellement utiles, il y a deux rôles de plus qu'ils peuvent remplir : le filtrage et le couplage.

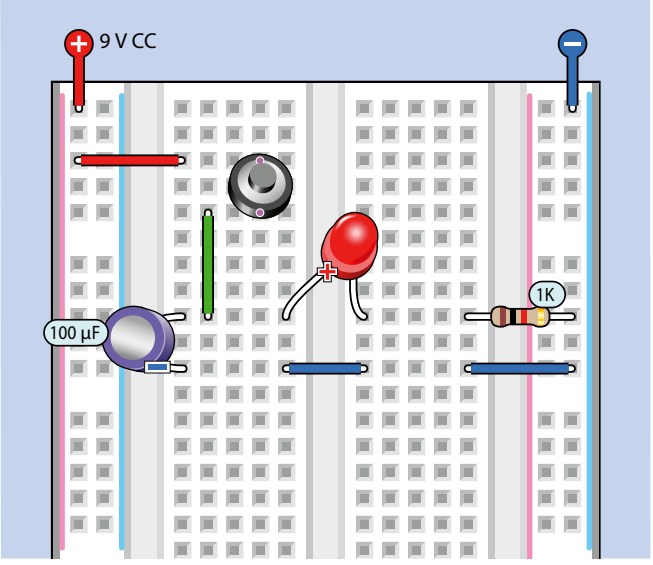


Figure 9-6. *Démonstration du filtrage.*

Fondamentaux : le filtrage

Un condensateur peut être utilisé pour filtrer un signal, le circuit de la figure 9-6 va vous permettre d'en faire une rapide démonstration. Son principe est similaire à celui de la figure 8-15 si ce n'est que la résistance de 1K a été remplacée par un fil de pontage vert, la valeur du condensateur est maintenant de 100 µF au lieu de 1 000 µF et les deux fils de pontage jaunes ont été retirés.

Actionnez le bouton-poussoir aussi rapidement que vous le pouvez, et observez la LED. Retirez ensuite le condensateur et recommencez le test. Vous remarquerez que quand le

condensateur est présent, les transitions allumée-éteinte de la LED sont moins violentes, il les a adoucies en les filtrant.

Le schéma de la figure 9-7 va clarifier la façon dont un condensateur est utilisé pour filtrer. Supposons que la tension de votre pile ne soit pas stabilisée à 9 V. Elle fluctue de façon erratique, et les autres composants de votre schéma n'apprécient pas. Si vous ajoutez un condensateur, il absorbe chaque petite variation que nous appelons un *pic* de tension d'alimentation. Le condensateur le restitue ensuite, avant que le prochain pic ne se produise.

Les pics de tension sont également appelés des *transitoires* car ils sont très brefs.

Si vous utilisez un condensateur de plus faible valeur, il aurait un effet de filtrage moins important mais il absorberait une charge plus rapidement. Voici le principe de base :

> *Un plus petit condensateur peut filtrer des fluctuations de courant moins importantes, mais plus brèves et qui se répètent plus rapidement.*

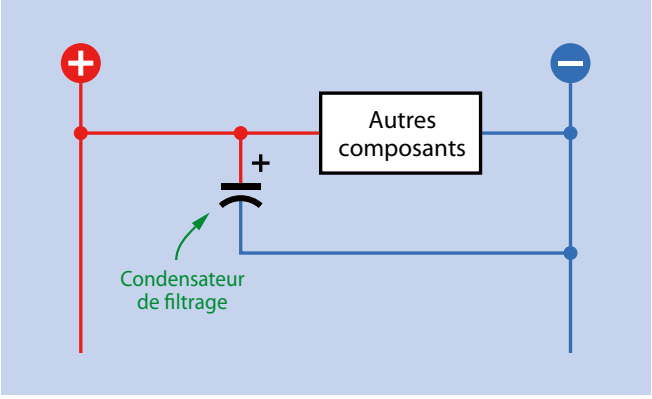


Figure 9-7. *Configuration de base du filtrage par un condensateur.*

Cette possibilité peut être très utile s'il a y du bruit électrique dont vous souhaitez vous débarrasser. Si par exemple, vous utilisez un adaptateur secteur à brancher sur une prise de courant pour obtenir une tension continue CC destinée à un appareil comme une lampe de bureau, il se pourrait que cet adaptateur génère une tension comportant des pics de bruit. Cela convient parfaitement à une lampe, mais si vous voulez l'utiliser pour alimenter un circuit utilisant des semi-conducteurs, vous devrez ajouter un condensateur pour filtrer la tension.

Autre application : en choisissant spécifiquement la valeur du condensateur, celui-ci sera sensible à certaines fréquences.

Cela peut être utile dans les circuits audiophoniques. La figure 9-8 représente un signal entaché d'un bruit important, avant et après avoir été filtré par un condensateur.

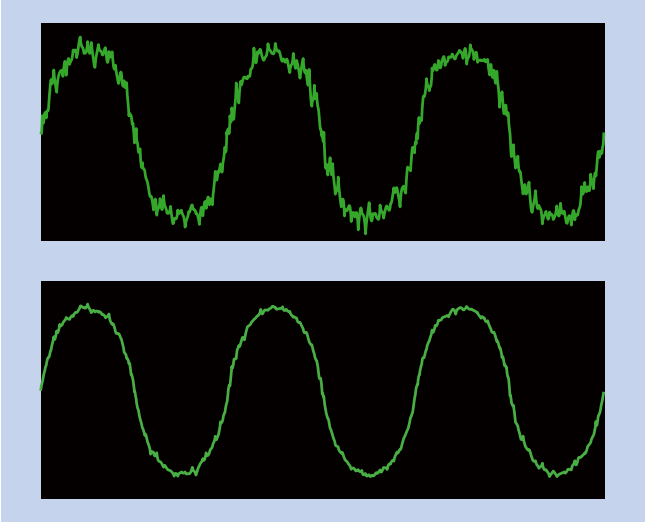


Figure 9-8. *En haut, signal audible comportant un bruit important ; en bas, le même signal après filtration par un condensateur.*

Fondamentaux : Le couplage capacitif

Je vais maintenant vous montrer un effet surprenant qu'un condensateur peut réaliser. C'est un phénomène souvent mal compris.

Dans l'expérience 8, j'ai indiqué qu'un condensateur bloquait le courant continu CC (en supposant qu'il soit utilisé correctement s'il est polarisé), mais ce blocage n'existe que si la tension est stable. De brusques variations de la tension donneront l'impression que le courant traverse le condensateur.

Comment cela est-il possible ? Ça semble être inimaginable, car les deux plaques d'un condensateur ne se touchent pas.

Je vais revenir sur ce « comment » dans un moment. Il faut toujours commencer par en faire une constatation par soi-même.

Regardez les composants de la plaque de montage de la figure 9-9. Notez que j'ai inversé le condensateur de 1 000 µF. Le bouton inférieur permet toujours de décharger le condensateur, celui du haut de le charger. Les résistances de 100 ohms sont présentes pour protéger les boutons-poussoirs des pointes de courant.

La connexion de la LED à la liaison inférieure du condensateur qui n'est plus reliée à la masse est une des caractéristiques importantes de ce circuit. La figure 9-10 représente le schéma de ce nouveau circuit.

Commencez par appuyer sur le bouton du bas afin de vous assurer que les deux bornes du condensateur sont au même potentiel. Relâchez ce bouton, puis appuyez sur celui du haut. Vous verrez alors la LED s'illuminer, puis faiblir lentement bien que vous mainteniez la pression de votre doigt sur le bouton.

Relâchez le bouton du haut et enfoncez-le à nouveau. Cette fois, rien ne se passe. Apparemment, pour que l'expérience fonctionne, le condensateur doit d'abord être déchargé.

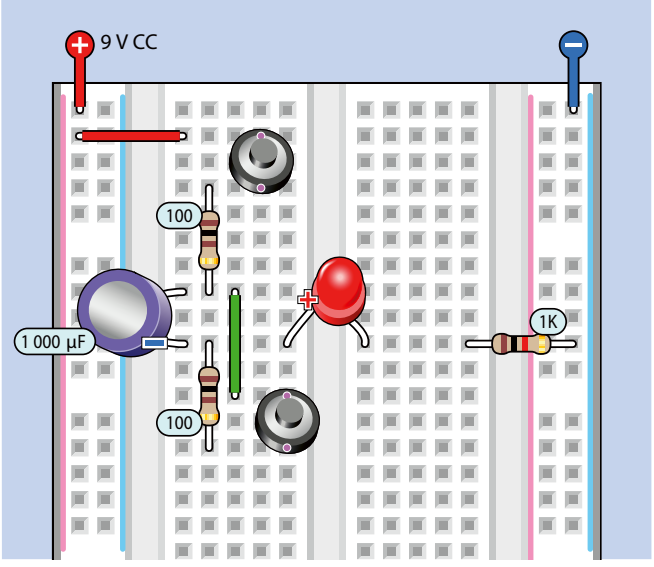


Figure 9-9. *Circuit démontrant le couplage capacitif.*

Appuyez à nouveau sur le bouton du bas pour décharger le condensateur, puis sur le bouton supérieur, la LED s'allume à nouveau.

D'où provient le courant qui a permis d'allumer la LED ? Il n'y a qu'une seule possibilité, en provenance du bouton-poussoir, il doit avoir traversé le condensateur d'une façon ou d'une autre !

J'ai fait cette expérience en observant les signaux aux bornes du condensateur à l'aide d'un oscilloscope qui permet de voir les variations rapides de la tension des signaux. Les courbes obtenues sont sur la figure 9-11. J'ai maintenu mon doigt sur le bouton supérieur pendant environ deux secondes. La plaque supérieure du condensateur s'est chargée très rapidement car il n'y a qu'une résistance de 100 ohms pour ralentir ce processus. Mais une tension est également apparue sur la plaque inférieure, presque simultanément, avant d'être graduellement absorbée par la LED.

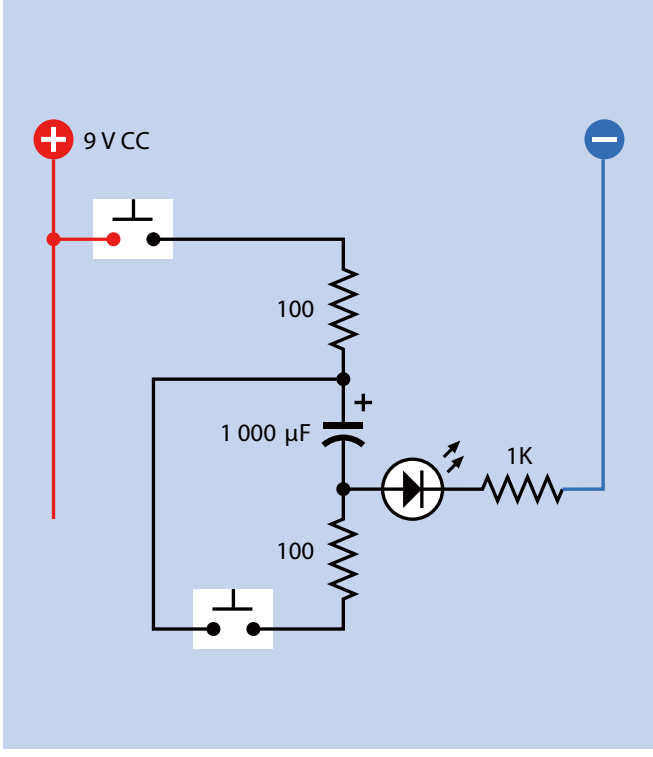


Figure 9-10. *Schéma du circuit de la figure 9-9.*

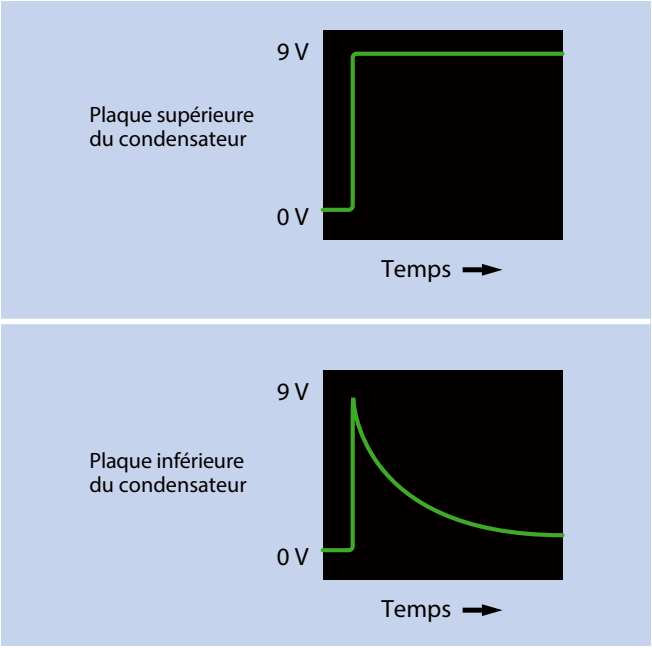


Figure 9-11. *Pointe de tension, absorbée par une charge reliée au pôle négatif de l'alimentation, durant la charge du condensateur quand une impulsion le traverse.*

Dans la plupart des ouvrages de formation, vous trouverez une explication de ce type :

> *Un condensateur bloque le courant continu (CC), mais permet le passage du courant alternatif (CA).*

Tout le monde est d'accord sur ce point, et ma petite démonstration prouve qu'une impulsion rapide le traverse. En fait, ce principe est utilisé dans des millions, voire des trillions d'appareils électroniques.

L'ennui, c'est que cela n'aide pas à comprendre comment ça se produit.

Au début, le chercheur James Maxwell pensait que le phénomène était impossible, néanmoins il constatait que cela se produisait. Il développa alors une théorie expliquant pourquoi il en était ainsi. Il appela l'impulsion traversant le condensateur un ***déplacement de courant***. En d'autres termes, le courant se déplaçait d'un côté du condensateur à l'autre.

Si vous vous documentez au sujet du déplacement de courant, vous trouverez des affirmations telles que :

« Peu de sujets de la physique moderne ont provoqué autant de confusion et incompréhension que le déplacement de courant. Cela est dû en partie au fait que Maxwell a utilisé un nuage de vortex moléculaires dans ses équations alors que les ouvrages modernes sont fondés sur le fait qu'un déplacement de courant peut exister dans un espace libre. »

Vortex moléculaires ?

Cela dépasse quelque peu les limites d'un ouvrage d'introduction à l'électronique, mais sa présentation devient rapidement un challenge en aboutissant à des équations complexes. C'est sans doute pour cela que de nombreux auteurs évitent d'en parler. Ce n'est pas simple du tout.

Tout ce que vous devez savoir est très simplement résumé ainsi. Le déplacement de courant existe ! Un brusque changement de la tension à une borne d'un condensateur introduit un changement identique de la tension de l'autre borne, comme s'il réagissait par sympathie.

Je vais maintenant vous montrer deux applications dans lesquelles ce phénomène est utile.

Le couplage en pratique

Le couplage capacitif peut convertir une longue impulsion en une impulsion plus brève quand on appuie sur un bouton. Sur la figure 9-12, un dispositif doit être déclenché rapidement. La résistance de 10K à droite est appelée ***résistance de rappel***, elle maintient l'entrée du dispositif au potentiel 0 V. Quand quelqu'un appuie sur le bouton, une impulsion rapide traverse le condensateur. Cela provoque l'augmentation de la tension de l'entrée du dispositif pendant un instant, en contrariant l'action de la résistance de 10K jusqu'à ce que la charge du condensateur disparaisse et qu'ainsi le circuit revienne à son état d'origine. Vous remarquerez que la personne peut maintenir le bouton appuyé, le condensateur ne permet que le passage de la première impulsion.

La durée de l'impulsion va dépendre de la valeur du condensateur utilisé. Un condensateur de 0,1 µF conviendra à cette application. La résistance de 10K conviendra également, permettant au condensateur d'avoir une charge nulle.

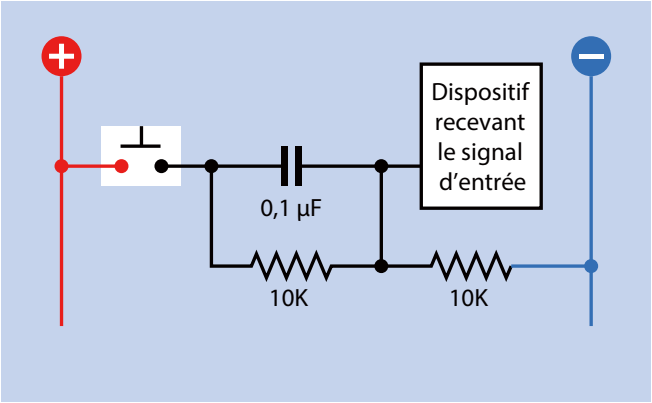


Figure 9-12. *Condensateur de couplage utilisé avec une résistance de rappel pour créer une entrée épurée.*

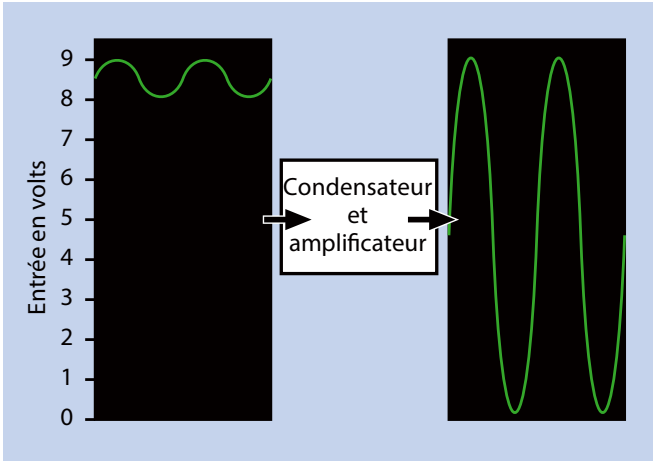


Figure 9-13. *Suppression du décalage d'un signal audio.*

L'utilisation d'un condensateur de cette façon est appelée couplage capacitif car elle relie une partie d'un circuit à une autre.

Si le dispositif doit recevoir une impulsion négative, il suffit d'inverser la polarité de la tension d'alimentation. La *résistance de rappel* deviendrait alors une *résistance de tirage*, et le circuit contrariera la tension positive de l'entrée du dispositif par une impulsion négative. Vous me verrez utiliser cette technique dans plusieurs projets de ce livre.

Voici une autre utilisation commune d'un condensateur de couplage. Elle permet de relier une source de signal audiophonique à un amplificateur. Sur la figure 9-13, la source audio évolue entre 8 et 9 V, le décalage par rapport à la tension 0 V est également appelé *offset*. Si vous reliez la source directement à l'amplificateur, vous amplifierez l'offset et le signal. Si votre amplificateur a un gain de 10, il multipliera cette tension par 10 et délivrera une tension variant entre 80 et 90 volts ce qui n'est pas très utile.

En principe, si vous transmettez le signal au travers d'un condensateur de valeur appropriée, l'offset sera bloqué, seules les variations du signal seront transmises. Si vous les amplifiez, en ajoutant quelques composants, vous obtiendrez un signal compris entre 0 et 9 volts.

À venir : les composants actifs

J'ai fourni de nombreuses informations détaillées au sujet des condensateurs car ils sont très importants et versatiles. Je ne m'attends pas à ce que vous reteniez tout, mais vous pourrez vous référer ultérieurement à ces explications, lorsque je commencerai à mettre ces concepts en pratique.

Les résistances et les condensateurs sont appelés *composants passifs*. Ils ne commutent rien, ils n'amplifient rien et ils agissent sans nécessiter de source d'alimentation. Ils ne font que modifier les tensions et intensités parcourant un circuit.

Je vais maintenant vous parler des *composants actifs*, le premier et le plus important étant le *transistor*.

Expérience 10

Un interrupteur à transistor

De nos jours, les transistors sont devenus des éléments indispensables à notre quotidien. Ils ont ouvert la voie à des possibilités sans fin.

Vous aurez besoin de :

- 1 plaque de montage, du fil de câblage, pince coupante, pince à dénuder, fils de tests et votre multimètre comme précédemment
- 1 pile de 9 V et en option son connecteur
- 1 transistor 2N3904
- résistances : 100 ohms (1), 470 ohms (2), 1K (1), 33K (1), 10K (1), 330K (1)
- 1 condensateur de 1 µF
- 1 LED générique rouge
- 2 interrupteurs tactiles
- 1 interrupteur SPDT à glissière
- 1 relais (comme précédemment)
- 1 potentiomètre ajustable de 10K

Interrupteur à l'état solide

La figure 10-1 montre deux transistors, approximativement à leurs tailles réelles. Celui du haut est un composant monté en surface (CMS) mesurant environ 1,5 mm × 3 mm, aussi grand qu'un grain de riz. Il est agrandi dans le cercle blanc afin que vous puissiez le voir en détail. Ce transistor est prévu pour fonctionner sous une tension de 3,3 V. Celui du dessous est environ 25 fois plus volumineux, et il est prévu pour supporter une intensité de 100 ampères et fonctionner sous une tension de 600 V.

Quand les transistors sont apparus en 1948, je doute que quiconque ait pu imaginer qu'ils pourraient couvrir un aussi vaste domaine d'applications. Le monde actuel ne pourrait pas fonctionner sans eux.

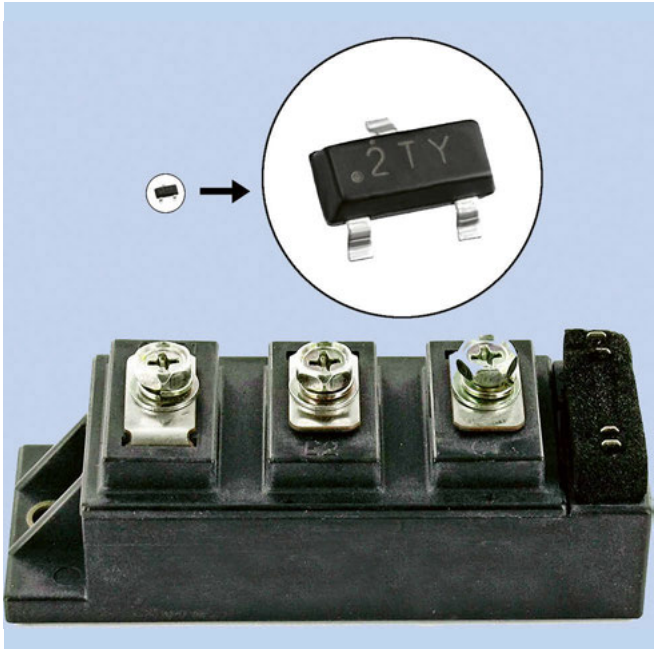


Figure 10-1. *Transistor monté en surface à gauche, et un transistor de puissance en dessous représentés à leur taille réelle. Le composant monté en surface est agrandi environ 10 fois dans le cercle blanc.*

Dans ce livre, j'utiliserai un transistor du type de celui représenté sur la figure 10-2. C'est un composant utilisé de façon habituelle dans des circuits sous une faible tension. Il est prévu pour fonctionner sous une tension de 40 V et capable de supporter une intensité de 200 mA. Sa référence est 2N3904, son corps en plastique noir arrondi à l'arrière et aplati devant mesurer approximativement 6 mm de diamètre et de hauteur.

Vous aurez besoin de connaitre le nom des trois fils de connexion de ce transistor tels que montrés sur la figure 10-3. Sa version en aluminium n'est pas très courante, mais je l'ai incluse au cas où vous le trouviez chez un fournisseur ou dans un surplus de composants. Si vous le tournez afin que sa petite languette soit orientée comme sur la figure, les fils ont la même fonction que ceux de sa version en plastique quand son côté aplati est orienté vers la droite.

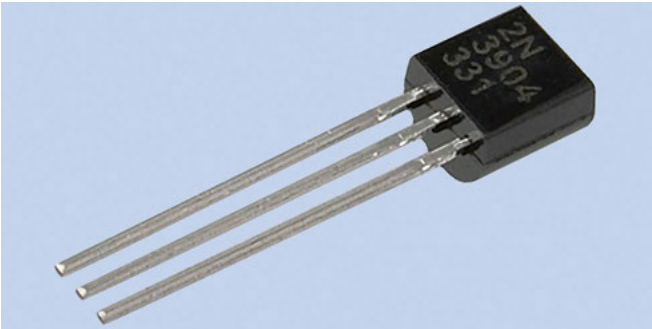


Figure 10-2. *Transistor 2N3904.*

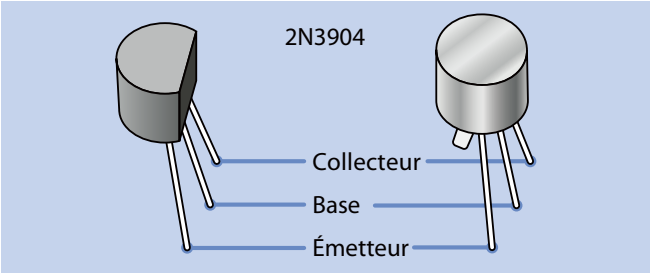


Figure 10-3. *Identification des fils d'un transistor 2N3904.*

> *Un transistor est sensible à la polarité. Vous pouvez l'endommager définitivement si vous le connectez dans le mauvais sens.*

Dans certaines conditions, un transistor peut fonctionner comme un relais. Le mieux, pour le comprendre, est de l'expérimenter. Assemblez le circuit de la figure 10-4 en prenant soin de bien différencier les deux résistances, l'une d'entre elles a la valeur de 100K (marron, noir, jaune), l'autre vaut 100 ohms (marron, noir, marron). Si vous craignez que la résistance de 100 ohms soit un peu trop faible pour protéger la LED, ne vous tracassez pas, le transistor ne fournira pas suffisamment de courant pour l'endommager.

Le bouton A est directement relié au collecteur du transistor par le fil de pontage jaune et les barrettes internes de la plaque de montage. Le bouton B est relié à la base du transistor par l'intermédiaire de la résistance de 100K. Le fil de pontage vert relie la LED et la résistance de 100 ohms à la masse de l'alimentation.

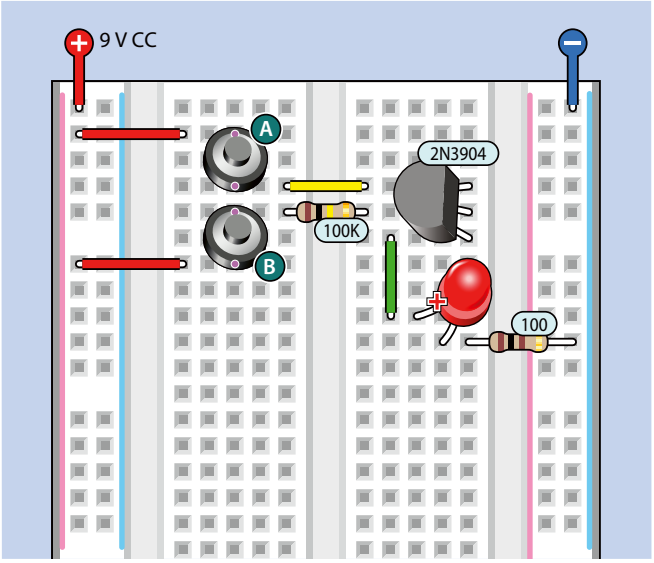


Figure 10-4. *Test d'un transistor, première partie.*

Appuyez sur le bouton B, vous devriez constater que la LED brille faiblement. Relâchez ce bouton et appuyez sur le bouton A, il ne devrait rien se passer.

Tout en maintenant le bouton A enfoncé, appuyez puis relâchez le bouton B. Vous constaterez que le bouton B contrôle le courant qui entre par le collecteur du transistor et ressort par son émetteur. La figure 10-5 illustre ce concept.

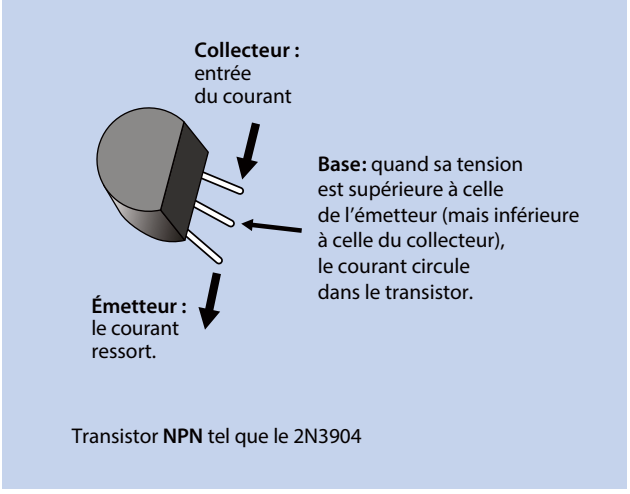


Figure 10-5. *Contrôle du flux de courant par un transistor NPN.*

Ce test amène à une conclusion importante :

- Du fait de la valeur élevée de la résistance de 100K, vous pouvez être certain que le courant qui entre par le fil central du transistor est faible.
- Donc, un courant très faible provoque le passage d'un courant beaucoup plus élevé, entrant par le fil supérieur du transistor.

Sur la figure 10-6, j'ai représenté quelques variantes du symbole de schématique pour ce transistor connu comme étant de type NPN, pour les raisons que je vais expliquer ensuite.

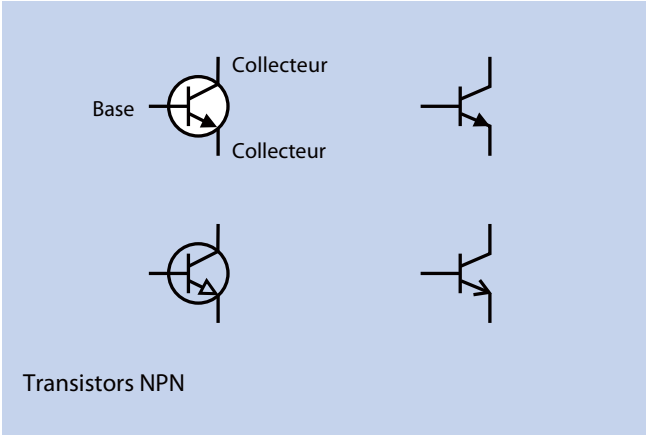


Figure 10-6. *Quelques symboles d'un transistor NPN.*

Quand le 2N3904 est orienté en présentant son côté aplati vers la droite, il correspond aux symboles représentés. Dans les schémas, vous trouverez des transistors avec ou sans le cercle les entourant, de plus, ils peuvent prendre n'importe quelle orientation, selon la préférence de la personne qui dessine le circuit. Soyez toujours attentif à la direction vers laquelle pointe la flèche du symbole d'un transistor NPN, afin de ne pas confondre l'émetteur et le collecteur.

Cette flèche indique le sens du courant (selon la convention, positif vers négatif) dans un transistor NPN.

Sur la figure 10-7, j'ai représenté le schéma du circuit que vous venez d'expérimenter.

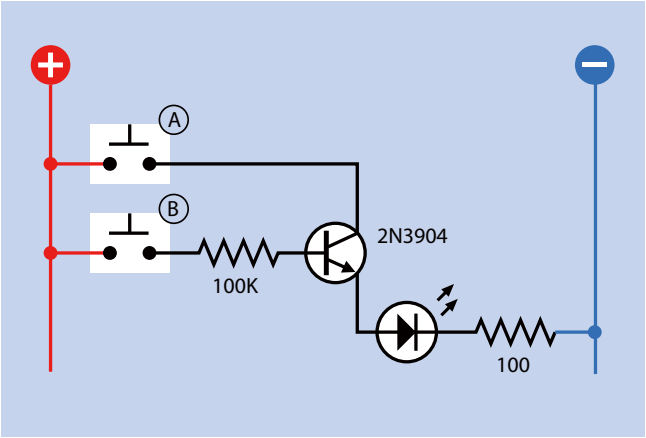


Figure 10-7. *Schéma du circuit de la figure 10-4.*

Fonctionnement

L'intérieur d'un 2N3904 est un sandwich constitué de deux types de silicium ayant une polarité opposée. Le premier est la *couche P* qui est porteuse d'un excès de charges positives ; c'est-à-dire d'un manque d'électrons, laissant ainsi la place pour l'arrivée de nouveaux électrons. Cette couche est placée entre deux *couches N* qui ont un surplus d'électrons. Ceci est illustré sur la figure 10-8. La tension appliquée à la base (la couche centrale), par rapport à l'émetteur est appelée *polarisation*.

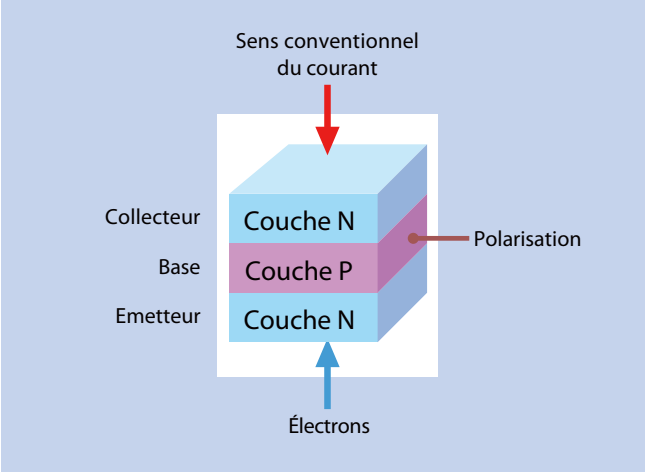


Figure 10-8. *Intérieur d'un transistor NPN.*

Les électrons ne peuvent pas entrer par la couche N du bas tant qu'ils ne sont pas attirés par la polarisation positive appliquée à la couche P. Cela les piège à l'intérieur, et dès qu'ils reçoivent de l'énergie, ils continuent jusqu'à la couche N supérieure à laquelle une tension positive externe est appliquée. Rappelez-vous que dans le sens conventionnel, le courant circule dans le sens opposé à celui des électrons, c'est pourquoi la couche supérieure est appelée collecteur et la couche du bas l'émetteur, c'est aussi pourquoi la flèche est orientée vers l'extérieur et indique ainsi le sens conventionnel du courant.

Dans tous les symboles, une flèche indique le sens conventionnel d'écoulement du courant. (Les deux flèches ajoutées au symbole d'une LED indiquent la lumière, pas le courant électrique.)

Le comportement des transistors PNP est l'inverse de celui des transistors NPN, car ils ont deux couches P et une couche N placée entre ces dernières. Leurs symboles sont représentés sur la figure 10-9.

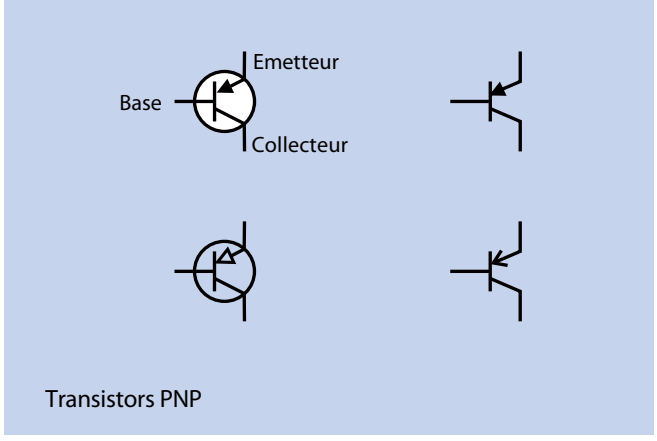


Figure 10-9. *Quelques symboles d'un transistor PNP.*

Un transistor PNP est assez déroutant (en tout cas je le trouve) car c'est une version inversée d'un transistor NPN. L'émetteur est muni d'une flèche pointant vers l'intérieur. Cette flèche indique encore le sens conventionnel du courant, mais maintenant, le transistor devient conducteur quand la tension de la base est inférieure à celle de l'émetteur, au lieu d'être plus élevée.

- Transistor NPN : l'accroissement de la tension de la base provoque le passage du courant du collecteur vers l'émetteur.
- Transistor PNP : la réduction de la tension de la base provoque le passage du courant de l'émetteur vers le collecteur.

Il est facile de confondre les symboles NPN et PNP, il y a toutefois un moyen rapide de se rappeler lequel est le bon :

- La flèche du symbole d'un transistor NPN « ***N***'est ***P***as vers le ***N***ord (en haut !) »

De nombreux aspects d'un transistor PNP étant l'inverse de ceux d'un transistor NPN, vous ne serez pas surpris que le courant le traverse comme l'indique la figure 10-10.

Tous les transistors NPN et PNP sont des transistors à jonctions bipolaires (*Bipolar Junction Transistor* abrégé BJT) car ils comportent deux jonctions entre leurs trois couches. Il existe de nombreuses autres variétés de transistors, mais je n'ai pas assez de place dans ce livre pour tous les décrire.

Mes schémas montrent le nom des fils de connexion des transistors 2N3904 et 2N3906 relativement à leur côté aplati. Les autres transistors ont un brochage différent. Consultez leurs fiches techniques pour plus de détails.

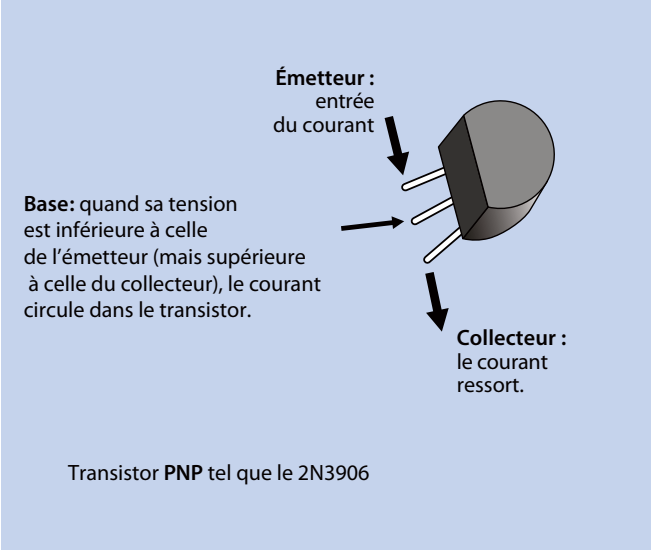


Figure 10-10. *Contrôle du flux de courant par un transistor PNP.*

Vous pourriez vous demander pourquoi deux types de transistors aux fonctionnements inversés sont nécessaires ? C'est parce que dans certains circuits, les transistors PNP conviennent mieux. Les transistors NPN sont cependant les plus utilisés, d'ailleurs, aucun des projets de ce livre n'utilise de transistor PNP.

L'expérience précédente vous a montré comment une tension positive appliquée à la base d'un transistor bipolaire NPN pouvait contrôler le passage d'un courant. Que se passerait-il si la tension de la base variait légèrement ? C'est le moment de faire un autre test dans lequel vous allez voir qu'un transistor peut *amplifier* les variations d'un courant entrant dans sa base.

Fondamentaux : l'amplification

Commencez en réglant votre multimètre pour la mesure des intensités en mA et insérez le fil de mesure rouge dans la borne adéquate, choisissez le calibre le plus faible si vous avez un multimètre à calibre manuel.

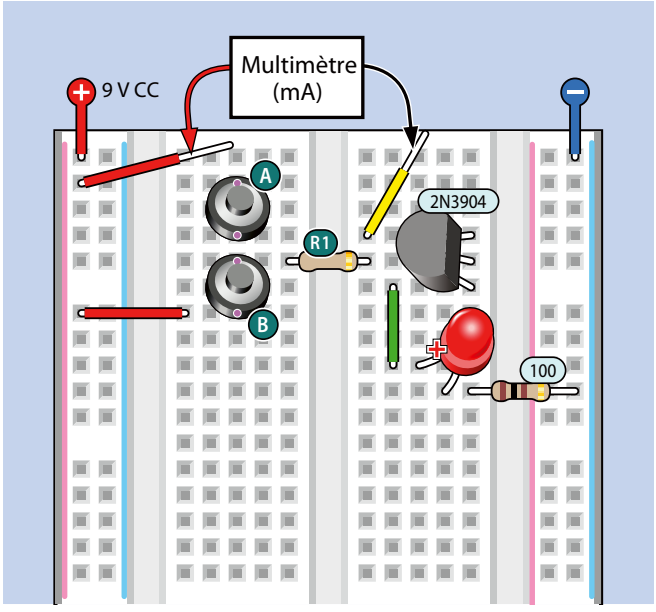


Figure 10-11. *Mesure du courant entrant par le collecteur d'un transistor NPN.*

Pour déterminer l'intensité du courant qui entre dans votre transistor 2N3904 par le collecteur, réalisez le circuit représenté sur la figure 10-11. Placez une extrémité du fil de pontage rouge en dehors du circuit, faites de même pour le fil jaune et reliez votre multimètre à ces fils. Essayez maintenant une par une trois résistances pour la résistance mystérieuse portant le repère R1. Vous aurez besoin d'une résistance de 33K, une de 100K et une de 330K. Insérez-les l'une après l'autre, en appuyant à chaque fois sur le bouton B, et notez la valeur du courant que vous indique votre multimètre. (Il est inutile d'appuyer sur le bouton A car vous l'avez remplacé par votre multimètre.)

J'aimerais maintenant que vous mesuriez le courant qui entre par la base, dans chacun des cas précédents. Pour cela, réinsérez les fils rouge et jaune, et connectez votre multimètre entre l'autre fil de pontage rouge et la résistance, comme sur la figure 10-12. En utilisant successivement chacune des résistances (33K, 100K et 330K), appuyez sur le bouton A (vous n'avez pas besoin d'appuyer sur le bouton B car celui-ci est remplacé par votre multimètre).

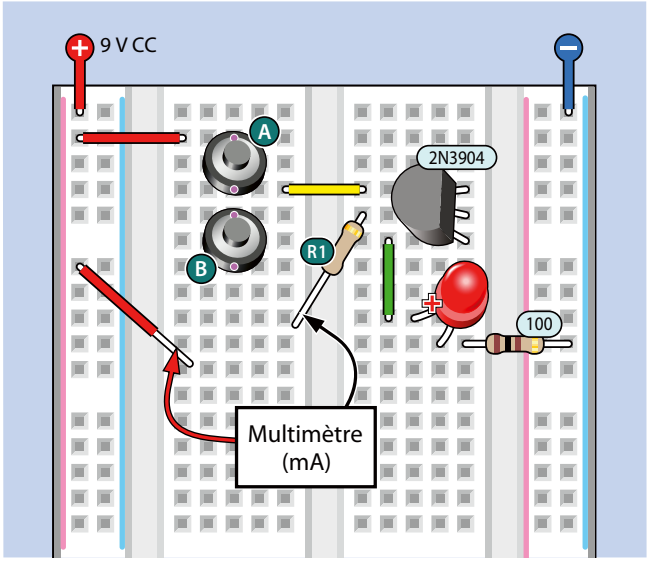


Figure 10-12. *Mesure du courant entrant par la base d'un transistor NPN.*

Que pouvez vous déduire des mesures faites ? Vous pouvez créer un tableau comme celui de la figure 10-13.

Sans doute vous demandez-vous ce que représente la troisième colonne nommée « bêta », je l'ai créée à l'aide de ma calculatrice en divisant le courant collecteur par le courant de base dans chaque cas, faites-en de même avec vos valeurs.

- *Valeur bêta* = Intensité du collecteur / intensité de la base
- La valeur bêta est le facteur d'amplification du transistor appelé *gain en courant*.

Pour chaque résistance, la valeur bêta semble se situer aux alentours de 190. La leçon importante à retenir est que le facteur d'amplification reste identique quel que soit le courant injecté dans la base, au moins pour les trois valeurs que vous avez utilisées. On dit qu'un transistor a une *réponse linéaire*, ce qui est important pour les applications telles que l'amplification de la musique.

L'intensité du courant collecteur de ces essais était d'environ 20 mA quand vous utilisiez la résistance de 33K. Si vous aviez diminué la valeur de cette résistance de la base, afin que le transistor fasse passer un courant plus élevé, vous auriez pu constater que la valeur du gain bêta restait sensiblement constante jusqu'à la limite du transistor qui est de 200 mA, mais cela aurait détruit la LED, délivrer un courant de 200 mA aurait également été une épreuve pour la pile de 9 V CC.

Résistance de la base	Courant de la base (mA)	Courant du collecteur (mA)	Gain bêta
33K	0,12	22,0	183
100K	0,056	10,6	189
330K	0,020	3,8	190

Figure 10-13. *Valeurs expérimentales du test de votre transistor.*

Pour le plaisir maintenant, simplifiez le circuit comme sur la figure 10-14 et appuyez votre doigt sur les extrémités libres des fils de pontage jaune et rouge en observant la LED. Si rien ne se passe, humidifiez votre doigt et réessayez. Plus vous appuierez fortement, plus la luminosité de la LED sera importante. Le transistor amplifie la faible intensité du courant qui traverse votre doigt. (Faites attention à éviter que les fils rouge et jaune ne se touchent, le transistor ne l'apprécierait pas.)

Cette démonstration d'un interrupteur sensible au toucher est sans risque si le *courant électrique ne traverse que votre doigt*. Vous ne le ressentez pas car il est issu d'une petite pile de 9 V CC. Soyez prudent, n'utilisez jamais une tension supérieure pour ce test, et ne faites jamais traverser un courant électrique entre vos deux mains car il traverserait alors votre corps. Il n'y a aucun risque de soumettre votre corps à un choc électrique dans cette expérience car le courant est très faible, mais ne prenez pas l'habitude de laisser un courant électrique passer d'une main vers l'autre. Attention également, en touchant des fils, de ne pas les laisser pénétrer votre peau.

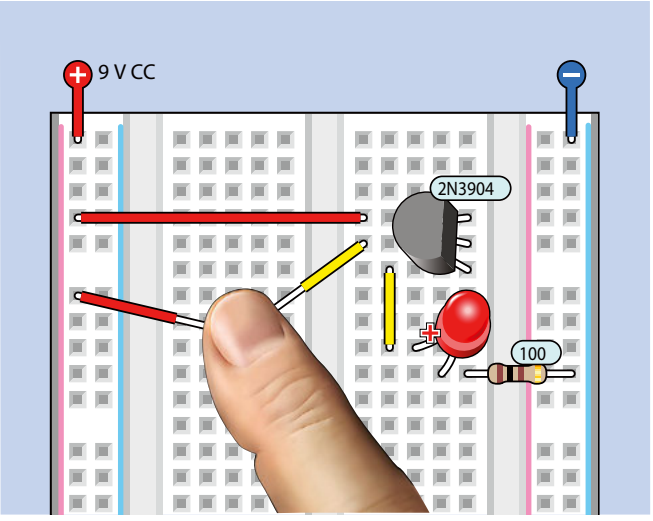


Figure 10-14. *Le test de l'interrupteur digital.*

Quelques remarques de base au sujet de l'amplification :

Un transistor bipolaire présente une *résistance effective* au passage du courant. Le mot « effective » signifie qu'il ne s'agit pas d'une simple résistance qui demeure stable. Elle change selon la polarisation de la base. Quand la polarisation est faible, la résistance effective est si grande que pratiquement aucun courant ne passe du collecteur vers l'émetteur. La résistance effective diminue quand le transistor commence à amplifier le courant de base. Finalement, le transistor est dit *saturé*,

quand sa résistance a diminué jusqu'au minimum possible et que le transistor a atteint ses limites au passage du courant.

- Quand un transistor est traversé par le courant maximum qu'il peut supporter, il est dit *saturé*.
- La tension appliquée à l'émetteur sera toujours inférieure à celle du collecteur. Par analogie, imaginez que c'est le prix à payer pour le service d'amplification rendu par le transistor.
- La tension délivrée en sortie étant inférieure à la tension reçue, un transistor bipolaire n'amplifie pas la tension mais il amplifie le courant.
- La base d'un transistor doit être au moins 0,7 V plus positive que son émetteur pour qu'il puisse être traversé par un courant.

Remarques importantes

Avant d'utiliser un transistor que vous n'avez jamais employé précédemment, rendez-vous sur Internet et consultez sa fiche technique *(datasheet)*. Rappelez-vous que beaucoup de transistors n'ont pas tous le même brochage que le 2N3904. Vérifiez également l'intensité maximum du courant admissible par ce transistor dans sa fiche technique.

- Si vous connectez un transistor dans le mauvais sens, il pourrait sembler fonctionner, mais pas correctement. Il pourrait également ne plus fonctionner du tout et être définitivement endommagé. (Devinez comment je l'ai su !)
- N'appliquez jamais une tension entre deux des fils d'un transistor. Il serait alors grillé. Limitez toujours le courant qui peut le traverser en utilisant un autre composant comme par exemple une résistance, de la même façon que vous protégez une LED.

Pour savoir si un transistor est toujours fonctionnel, retirez-le de la plaque de montage et insérez-le dans le support de votre multimètre identifié par les lettres C, B et E signifiant Collecteur, Base et Émetteur, prévu à cet effet. Positionnez le bouton du sélecteur sur le test des transistors généralement identifié par les lettres *hFE*. Il s'agit d'une abréviation de « paramètre hybride de gain à émetteur commun (*hybrid parameter Forward gain common Emitter*, en anglais), mais rassurez-vous, il est inutile de vous rappeler cela, retenez simplement hFE.

Insérez fermement le transistor dans le support et vous devriez voir un nombre affiché sur votre multimètre, il s'agit de la valeur du gain bêta. Si vous vérifiez un transistor en le connectant de façon erronée ou s'il est endommagé, la valeur affichée sera instable, nulle, inexistante ou bien inférieure à ce qu'elle devrait être (souvent plus petite que 50, habituellement inférieure à 5).

Il existe de nombreux autres types de transistors, en particulier les transistors *MOSFET* (*Metal Oxyde Semiconductor Field-Effect Transistor*, en anglais), qui sont beaucoup plus performants que les transistors bipolaires, mais le type bipolaire est le plus ancien, il est également moins vulnérable aux tensions excessives ou aux décharges électrostatiques, vous les détruirez tout de même si vous êtes peu respectueux en les manipulant.

Transistor ou relais ?

	Transistor	Relais
Fiabilité à long terme	Excellent	Limité
Peut être bipolaire ou à double position	Non	Oui
Peut commuter des courants importants	Limité	Oui
Peut commuter un courant alternatif	Habituellement non	Oui
Peut être commandé par un courant alternatif	Habituellement non	En option
Adapté à la miniaturisation	Excellent	Très limité
Capable de commuter à très haute vitesse	Oui	Non
Prix avantageux pour tension ou intensité élevée	Non	Oui
Prix avantageux pour tension ou intensité faible	Oui	Non
Courant de fuite faible en phase de non-conduction	Oui	Non

Figure 10-15. *Comparaison des caractéristiques des transistors et des relais.*

Je vais terminer cette introduction en comparant un transistor et un relais. Un relais ne peut pas amplifier une large gamme de courant comme un transistor, mais il peut commuter un courant. En ce cas, si vous avez une application de commutation, lequel devez-vous utiliser ? Cela dépend des circonstances résumées sur la figure 10-15.

Une des faiblesses des transistors NPN et PNP est la consommation énergétique qu'ils prélèvent pour assurer leur fonctionnement. Quand un relais est en position « repos », il ne consomme aucun courant. Quand il est « activé », il restitue entièrement le courant qui le traverse. Si vous utilisez un relais à verrouillage, il ne consomme aucun courant quelle que soit sa position., il n'a besoin que d'une impulsion pour passer d'une position à l'autre.

Les relais offrent plus de possibilités de commutation. Les différents types peuvent être normalement ouverts (NO), normalement fermés (NF ou NC), ou verrouillés. Un relais peut avoir des contacts à deux positions offrant le choix de deux positions pour le passage du courant, et être à double pôle, offrant des circuits séparés. Les circuits à un seul transistor ne peuvent pas offrir une telle diversité, il est cependant possible d'utiliser plusieurs transistors pour simuler ces comportements.

Historique : l'origine des transistors

Alors que les historiens associent l'origine des transistors à l'invention de la diode (qui permet le passage du courant dans une direction et le bloque dans la direction opposée), le premier transistor totalement fonctionnel a été développé en 1948 dans les laboratoires Bell par John Bardeen, William Shockley, et Walter Brattain, présents sur la figure 10-16.

Shockley était à la tête de l'équipe, dont l'objectif était d'étudier les relais statiques. Bardeen était le théoricien, et Brattain le technicien. Cela fut une collaboration hautement productive jusqu'au résultat. Shockley tenta alors de breveter le transistor en son nom propre. Quand il en informa ses collaborateurs, ceux-ci furent très mécontents.

Cette publicité largement diffusée n'a pas aidé car elle représentait Schockley assis au centre, face à un microscope, comme s'il avait fait le travail, laissant les autres le regarder en retrait. Une copie de cette image apparut sur la couverture du magazine *Electronics*. En réalité, Shockley était rarement présent dans le laboratoire où le travail fut effectué.

Figure 10-16. *Au premier plan, William Shockley, au fond, John Bardeen, à droite, Walter Brattain. Ils furent récompensés par le prix Nobel de Physique en 1956 pour leur collaboration dans le développement du premier transistor en 1948.*

Cette collaboration productive se désagrégea rapidement. Brattain demanda à être transféré dans un laboratoire différent chez AT & T. Bardeen partit poursuivre ses études en physique théorique à l'université de l'Illinois. Shockley quitta également les laboratoires Bell pour fonder la compagnie Shockley Semiconductors dans ce qui devint ensuite la Silicon Valley, mais ses ambitions dépassaient les possibilités technologiques de l'époque et sa compagnie ne fut jamais été rentable.

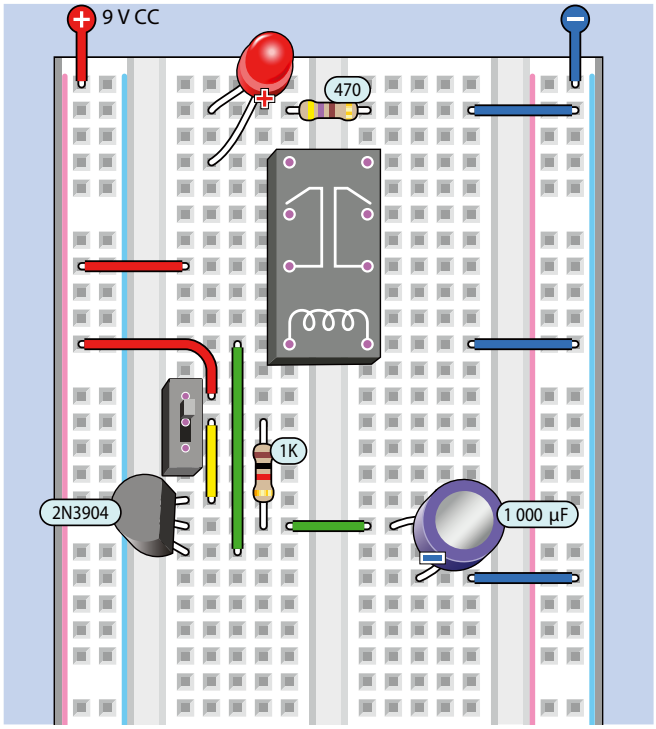


Figure 10-17. *Circuit d'un temporisateur simplifié.*

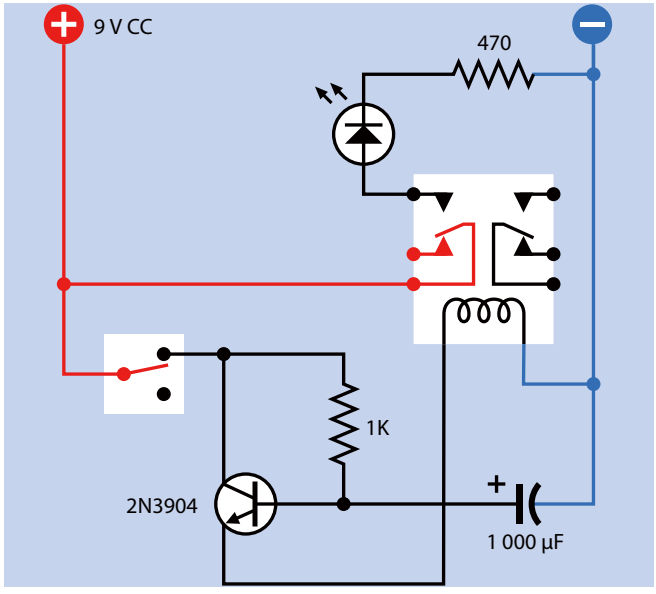


Figure 10-18. *Schéma du circuit de la figure 10-17.*

Huit des associés de Shockley démissionnèrent pour créer leur propre compagnie, Fairchild Semiconductor, qui devint un très important fabricant de transistors, puis de circuits intégrés.

En 2016, Fairchild a été racheté par On Semiconductor pour 2,4 milliards de dollars.

Le plus simple des temporisateurs

Je vous ai promis de réaliser un temporisateur n'utilisant que des composants déjà étudiés, le voici.

Sa réalisation sur une plaque de montage est représentée sur la figure 10-17. Placez les composants avec soin, car plusieurs d'entre eux sont très rapprochés. Commencez par l'interrupteur à deux positions avec son doigt de commande orienté vers le bas de la plaque et mettez-le en position haute. Une seconde plus tard, la LED devrait s'allumer.

Seulement une seconde ? Ce n'est pas beaucoup pour un temporisateur !

C'est vrai, mais je vais également vous montrer comment rendre ce temps variable. Commençons par voir comment cela fonctionne, la consultation du schéma de la figure 10-18 le permet facilement.

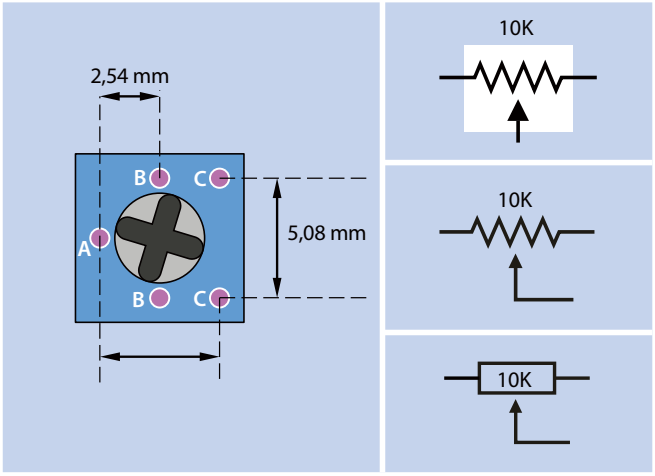


Figure 10-19. *Les broches situées sous votre potentiomètre ajustable doivent être positionnées selon l'un quelconque des ronds rouges pour les broches B et C. Sur la droite, il existe trois symboles représentant tous les types de potentiomètres ajustables quelle qu'en soit la valeur.*

Le relais, identique à celui de l'expérience 7, est connecté afin de pouvoir allumer la LED quand sa bobine est activée par une tension. Pour que cela fonctionne, j'ai uniquement besoin d'un condensateur qui se chargera en partant de la connexion au 0 V CC, et quand le condensateur aura atteint une tension suffisante, il actionnera le relais. C'est simple n'est-ce-pas ? Pas tout à fait en réalité.

Si je connecte le condensateur directement au relais, il se déchargera dans sa bobine en même temps qu'il se charge au travers de la résistance, et il n'atteindra jamais une tension assez élevée pour activer le relais. Rappelez-vous que la bobine du relais absorbe le courant avant même d'avoir déplacé les contacts.

Je ne pourrai pas prélever assez de courant pendant sa charge. Il me faudrait peut-être un amplificateur de courant. Ce pourrait être un transistor n'est-ce pas ?

Quand l'interrupteur de gauche sur la figure 10-18 est actionné vers le haut, il alimente la résistance de 1K. Le condensateur est également relié à la base du transistor qui atteint la même tension que celle du condensateur.

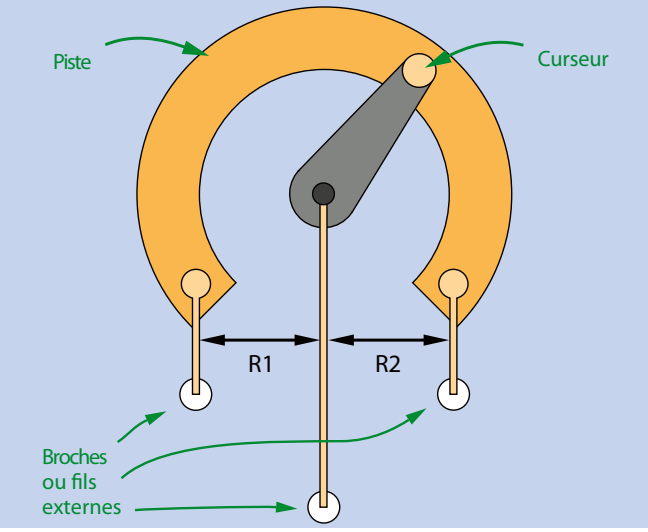


Figure 10-20. *Intérieur de tout potentiomètre. La résistance totale est égale à R1 + R2.*

Le courant provenant de l'interrupteur est également envoyé au collecteur du transistor, et le traverse jusqu'à l'émetteur qui alimente alors la bobine du relais. Le transistor ne sera pas surchargé car la bobine possède une résistance propre.

Le condensateur se charge, le transistor amplifie, la sortie est transmise à la bobine, et quand la sortie du transistor atteint environ 6 V, le relais allume la LED.

En utilisant les valeurs que j'ai choisies, le délai est d'environ une seconde.

Ce circuit pourrait-il devenir plus pratique ? Pour cela, j'ai besoin d'un composant dont la résistance est variable, afin de régler le temps que le condensateur va mettre pour atteindre la tension nécessaire. Il s'agit d'un ***potentiomètre***, le type dont j'ai besoin devra s'insérer dans une plaque de montage. Un ***potentiomètre ajustable*** va convenir à cet usage.

Réglage fin

Si vous revenez à la figure 6-23, vous verrez quelques potentiomètres ajustables. Sur la figure 10-19, vous verrez le plan d'un potentiomètre ajustable vu de dessus, avec des ronds roses indiquant la position des broches en dessous. Il y a trois broches, mais leurs positions peuvent varier. Vous pouvez utiliser un potentiomètre ajustable avec la broche A et les deux broches B ou C.

La distance entre les broches est importante, afin que votre potentiomètre puisse s'insérer dans une plaque de montage. Il existe de nombreuses autres variétés de potentiomètres ajustables, mais quand vous l'achèterez, vérifiez ses spécifications dans l'annexe A.

Sur la figure 10-19, j'ai également ajouté trois versions du symbole de schématique utilisable pour n'importe quel type de potentiomètre conventionnel, ou ajustable.

Souvenez-vous qu'un potentiomètre ajustable est un potentiomètre miniature. Je n'ai pas utilisé de potentiomètre de taille standard dans cette édition du livre ***L'électronique en pratique***, car ils ne sont plus guère utilisés. Vous pouvez les observer sur Internet si cela vous intéresse.

À l'intérieur de tout potentiomètre se trouvent une ***piste*** circulaire en matériau composite résistant, et un ***curseur*** en contact avec celle-ci, comme le montre la figure 10-20. Le curseur peut se déplacer sur la piste circulaire, il fait ainsi varier la valeur de la résistance entre le curseur et les extrémités de la piste.

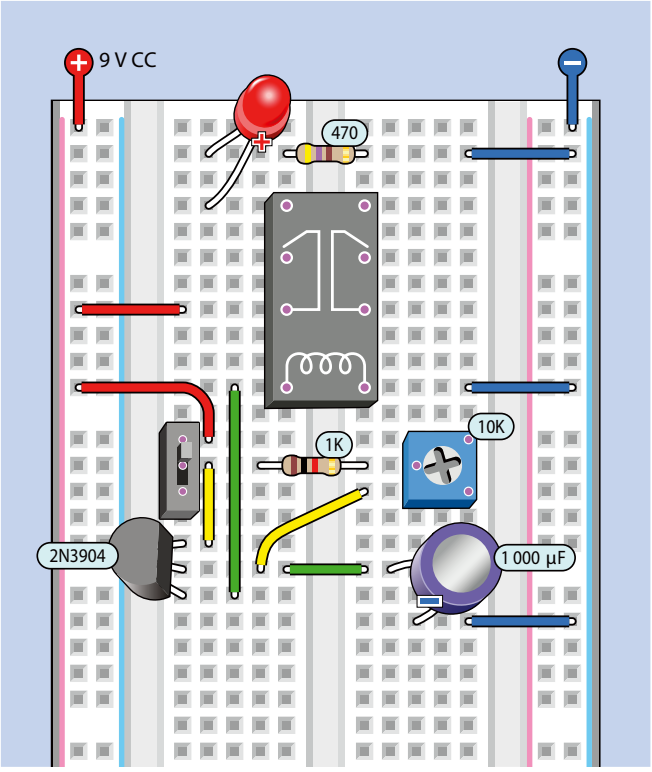


Figure 10-21. *Circuit du temporisateur incluant un potentiomètre ajustable permettant le réglage du délai.*

Si R1 est la résistance entre le curseur et l'extrémité gauche de la piste, et R2 la résistance entre le curseur et l'extrémité droite de la piste, le potentiomètre aura pour valeur nominale R1 + R2.

Pour l'expérience du temporisateur, je suggère d'utiliser un potentiomètre ajustable de 10K qui permettra de régler l'intervalle jusqu'à 11 secondes. Est-ce qu'un potentiomètre de 25K conviendrait si vous souhaitiez un délai plus important ? Probablement. Cependant, quand un condensateur prend davantage de temps pour se charger, il a également plus de temps pour que ses fuites internes de courant le rendent moins précis.

La figure 10-21 montre le potentiomètre ajustable ajouté à la plaque de montage. Je vous conseille d'utiliser un potentiomètre qui a ses broches dans les positions C de la figure 10-19, néanmoins, un potentiomètre ajustable ayant ses broches en positions B fonctionnera aussi bien, car elles seront reliées aux mêmes barrettes internes de la plaque de montage, tant que la broche A est orientée selon l'illustration.

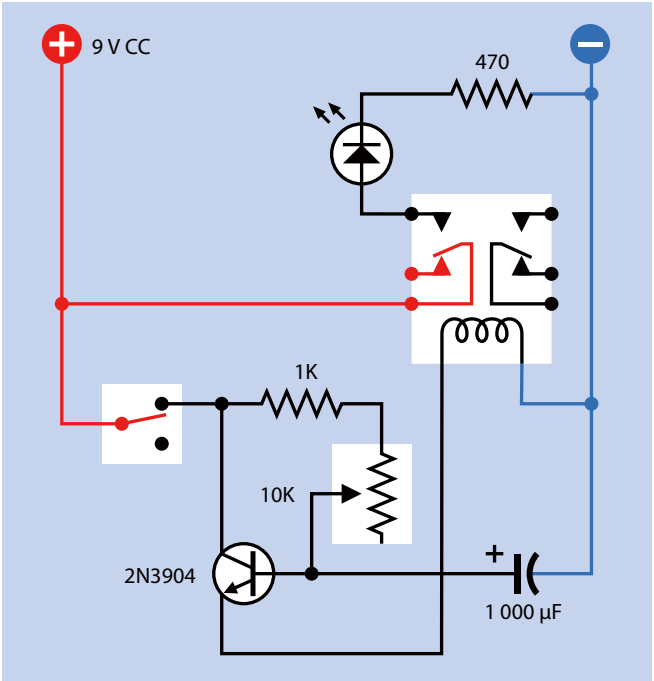


Figure 10-22. *Schéma du temporisateur réglable de la figure 10-21.*

La figure 10-22 contient le schéma de cette version du circuit. Vous verrez que j'ai ajouté le potentiomètre ajustable à la résistance de 1K afin que la valeur de la résistance entre le pôle positif de l'alimentation et la base du transistor puisse varier entre 1K et 11K.

Si vous voulez construire une version permanente de votre temporisateur, je vous suggère de vous procurer un potentiomètre de taille standard et de le monter dans un petit boiter. Faites-le fonctionner à l'aide d'un adaptateur CA ayant une sortie de 9 V CC, et testez-le pour différentes positions du bouton que vous associerez à l'axe du potentiomètre. Réalisez un cadran semi-circulaire en papier et utilisez un chronomètre de précision ou une application pour graduer le cadran de 1 à 10 secondes, ou éventuellement de 1 à 20 secondes ou... je ne sais jusqu'où vous pouvez étendre la plage de temps.

Expérience 11
Son et lumière

Un circuit clignoteur est présent dans pratiquement tous les livres d'introduction à l'électronique. Faire clignoter une LED n'est pas particulièrement excitant, mais il y a de bonnes raisons d'en parler : le résultat est immédiat, et un modeste clignoteur peut mener à des sujets importants.

Quels sujets exactement ? Eh bien, dans cette expérience, nous passerons d'un clignoteur à LED, à une sortie sonore qui retentit comme une alarme de voiture. Après cela, le croirez-vous, on simulera le chant d'un oiseau ?

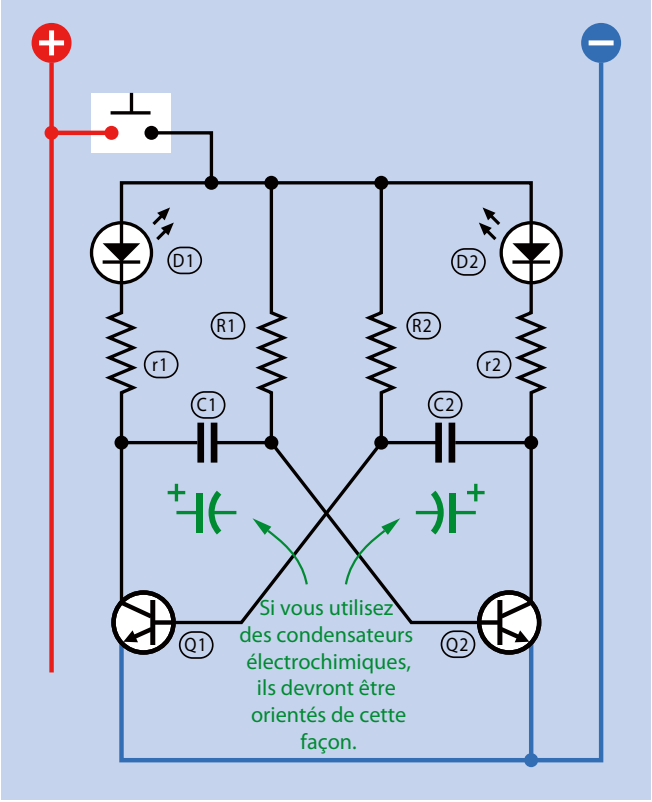


Figure 11-1. *Circuit multivibrateur astable courant paraissant simple mais souvent mal compris.*

En écrivant cette troisième édition de *L'électronique en pratique*, mon unique interrogation était : *quel type* de clignoteur devais-je décrire ?

Je souhaitais qu'il soit le plus simple possible à réaliser et à comprendre, mais en approfondissant la connaissance de plusieurs circuits, j'ai trouvé que certains étaient capricieux et ne commençaient pas toujours à clignoter, que d'autres utilisaient des bobines inductrices dont je ne parlerai pas avant le chapitre 5. Quelques-uns utilisaient un transistor unijonction devenu obsolète et au futur incertain, beaucoup d'autres utilisaient un circuit intégré dont je ne veux pas parler avant le chapitre 4. Finalement, je suis revenu au circuit que j'utilisais dans la seconde édition, car il est fiable et flexible. Certains lecteurs ont trouvé qu'il était difficile à comprendre, c'est pourquoi j'ai ajouté beaucoup d'informations supplémentaires à son sujet.

Vous aurez besoin de :

- 1 plaque de montage, du fil de câblage, pince coupante, pince à dénuder, fils de tests et votre multimètre comme précédemment
- 1 transistor 2N3904
- 1 pile de 9 V et en option son connecteur
- résistances : 100 ohms (1), 470 ohms (1), 1K (1), 4,7K (4), 10K (1), 47K (2), 470K (2)
- condensateurs : 10 nF (3), 1 µF (2, de préférence en céramique), 47 µF (2, en option)
- 2 LED génériques
- 2 interrupteurs tactiles
- 1 petit haut-parleur de 8 ohms

Le multivibrateur, cet incompris

Un circuit clignoteur est parfois appelé *oscillateur*, bien que cela ne soit pas exact car la sortie d'un oscillateur devrait varier progressivement selon une courbe connue sous le nom d'*onde sinusoïdale*.

Un clignoteur délivre un signal de sortie qui bascule entre les états actif et inactif (on et off en anglais), communément appelé *multivibrateur astable*. C'est un mot étrange, mais vous verrez qu'il a du sens : sa sortie n'est pas stable et vibre.

Recherchez en ligne l'expression : « `multivibrateur astable à transistor` ».

Naviguez entre les images, vous verrez plus de 100 versions du circuit montré sur la figure 11-1.

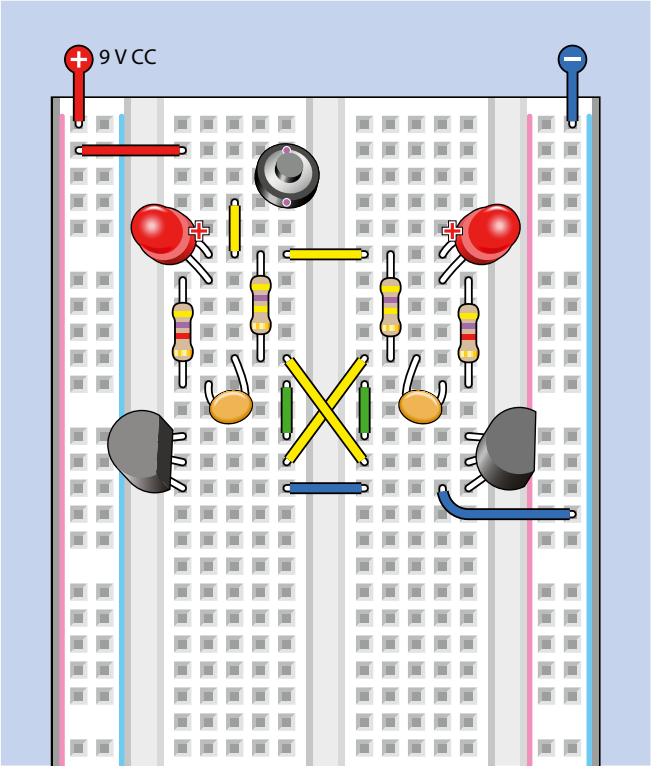


Figure 11-2. *Plan de la plaque de montage d'un multivibrateur astable utilisant des LED en sortie.*

Les images sont accompagnées de descriptions du fonctionnement des circuits, mais quelque chose est troublant, très peu de gens mentionnent le déplacement de courant pourtant fondamental, comme vous allez le voir d'ici peu. (Par chance, vous l'avez déjà observé dans l'expérience 9.)

Commencez par vous assurer que le circuit multivibrateur fonctionne. Sur la figure 11-1, j'ai identifié les composants afin de pouvoir m'y référer facilement. Sur la figure 11-2, j'indique comment les placer sur une plaque de montage, et sur la figure 11-3, vous trouverez une vue en transparence avec les valeurs des composants.

Soyez particulièrement attentif à les placer correctement, comptez les trous de la plaque afin d'obtenir un résultat parfait. Comparez le plan de la plaque de montage au schéma de la figure 11-1, vous devriez voir que les connexions sont les mêmes. J'ai utilisé des condensateurs en céramique, mais vous pouvez utiliser des condensateurs électrochimiques en prenant soin de les orienter correctement comme sur la figure 11-1. Je donnerai par la suite des explications supplémentaires en ce qui concerne l'utilisation de condensateurs électrochimiques.

Sur la figure 11-3, notez que les composants de la partie gauche de la plaque ont une valeur identique à ceux de la partie droite, ils sont organisés en miroir. Sur la figure 11-1, j'ai employé la lettre minuscule « r » pour les identifiants r1 et r2 afin de vous rappeler que ces résistances ont une valeur relativement faible de 4,7K alors que les résistances R1 et R2 ont une valeur de 470K chacune. Ne les confondez pas !

Incidemment, il est courant d'utiliser la lettre D pour identifier les LED, car ce sont des diodes. Les transistors sont identifiés par la lettre Q, probablement parce que les premiers transistors étaient encapsulés dans des petits boîtiers en aluminium ayant une languette qui les faisait ressembler à la lettre Q.

Quand vous appuyez sur le bouton, la LED devrait clignoter un peu plus rapidement qu'une fois par seconde.

Du fait que ce circuit est plus subtil que ceux que vous avez réalisés précédemment, je vais faire une pause pour vous donner quelques conseils, afin de vous sortir de la situation particulièrement frustrante d'être devant un circuit dont les composants ne produisent pas le résultat attendu. Cela arrive de temps à autre à tout le monde, mais il existe des stratégies bien établies pour s'en sortir.

Que faire quand ça ne fonctionne pas

1. Essayez d'être patient. Plus vous serez ennuyé et stressé, moins vous serez armé pour identifier un problème. Ne considérez pas le circuit comme un ennemi qui essaie de vous miner. Prenez-le comme un ami qui a juste besoin de votre aide.

2. Ne restez pas immobile à le regarder. Examinez ses composants sous tous les angles. Saisissez la plaque

de montage, tenez-la proche de vos yeux et observez les rangées de trous afin de vérifier exactement les fils qui y sont insérés.

3. Utilisez une loupe. Personnellement, je conserve une paire de lunettes adaptées à un travail de très près, et j'ai une loupe sur une monture du type de celui de la figure 12-11. Une autre option pouvant vous être utile consiste à utiliser l'appareil photo de votre smartphone en mode macro et regarder son écran comme un microscope.

4. Utilisez toujours une lampe de bureau. En fait, encore mieux, ayez-en deux éclairant de chaque côté afin qu'aucun détail ne soit dissimulé par une ombre.

5. Scannez ou photographiez les plans de ce livre et imprimez-les à une plus grande échelle. Si vous imprimez votre propre agrandissement, vous pouvez repérer avec un crayon chaque composant que vous installez.

6. Vérifiez toutes les valeurs. Si vous confondez le jaune et le marron en observant les anneaux d'une résistance, vous pourrez vous tromper et utiliser des valeurs 1 000 fois plus grandes ou plus petites. Le mieux serait de vérifier la valeur de chaque composant à l'aide de votre multimètre avant de les insérer sur la plaque. C'est plus rapide que de devoir les retirer par la suite pour vérifier leurs valeurs. Lisez les identifications des transistors et servez-vous de votre multimètre pour les vérifier. Il se pourrait que vous ayez endommagé un transistor sans vous en apercevoir.

7. Vérifiez la consommation de courant. Réglez votre multimètre pour la mesure des intensités en mA et insérez-le entre le pôle positif de la pile et le bus positif de la plaque de montage. Si une erreur de câblage provoque un court-circuit, la valeur affichée par le multimètre sera élevée. Le circuit devrait consommer moins de 50 mA.

8. Vérifiez les tensions en divers points de la plaque en reliant le fil noir de votre multimètre au pôle négatif de votre alimentation à l'aide d'un fil de test muni d'une pince crocodile. Réglez votre multimètre pour la mesure des tensions continues et déplacez la pointe de touche du fil rouge à divers endroits de la plaque en maintenant le circuit sous tension. Tout point qui indiquerait une tension voisine de zéro volt pourrait indiquer une mauvaise connexion. Si vous utilisez une pile, n'oubliez pas de vérifier qu'elle est toujours en bon état.

9. Ne faites pas nécessairement confiance à votre plaque de montage, un modèle peu coûteux pourrait avoir des liaisons internes défectueuses, en particulier si vous avez précédemment inséré des fils de diamètre important.

10. Si vous ne trouvez toujours pas la cause d'une erreur, éloignez-vous et marchez quelques instants. Fréquemment, si vous faites une pause et revenez à votre travail, vous trouverez rapidement une erreur.

Ces recommandations pourraient vous paraître évidentes, mais il est louable d'oublier parfois de faire les choses les plus élémentaires.

Suivons le courant

Pour commencer à comprendre ce qui se passe dans ce circuit, revenez au schéma de la figure 11-1, et réfléchissez aux conditions dans lesquelles la LED D1 s'allume. Le courant doit la traverser et revenir à la masse 0 V. Il traversera D1, puis la résistance r1, et devra traverser le transistor Q1.

Dans quelles circonstances Q1 va permettre le passage du courant ? Quand la tension de sa base dépasse 0,7 V par rapport à son émetteur qui est relié à la masse.

D'où provient la tension de sa base ? Elle est fournie par R2, mais il y a un problème : l'extrémité basse de R2 est également reliée à C2 et à la mise sous tension du circuit. C2 n'est pas chargé, le courant va donc pénétrer dans C2 jusqu'à ce que la tension atteigne la valeur de 0,7 V nécessaire à la base de Q1. Q1 va devenir conducteur et D1 s'allumera.

Puisque le montage est symétrique, la même chose se passe également de l'autre côté du circuit. Les composants des deux côtés du circuit ayant les mêmes valeurs, pourquoi les deux LED ne s'allument-elles pas simultanément ?

Une autre question se pose également. Qu'est-ce qui éteint les LED ?

Cela demande un regard plus attentif : pour cela, je vais décrire l'action en cinq étapes, commençant par l'étape 0 (voir figure 11-4). Je l'appelle étape 0 car cela permet d'examiner l'état du circuit lorsque vous le mettez sous tension, mais avant que le clignotement alternatif des LED ne commence.

J'ai utilisé des couleurs pour indiquer les tensions de façon inhabituelle, mais j'espère que cela va clarifier la situation.

J'ai également coloré chacun des transistors en vert lorsqu'il conduit, le laissant transparent (couleur du fond), quand il n'est pas actif.

J'ai identifié les plaques internes des condensateurs car j'aurai besoin de m'y référer. C1L est la plaque de gauche du condensateur C1, C1R sa plaque de droite, et ainsi de suite.

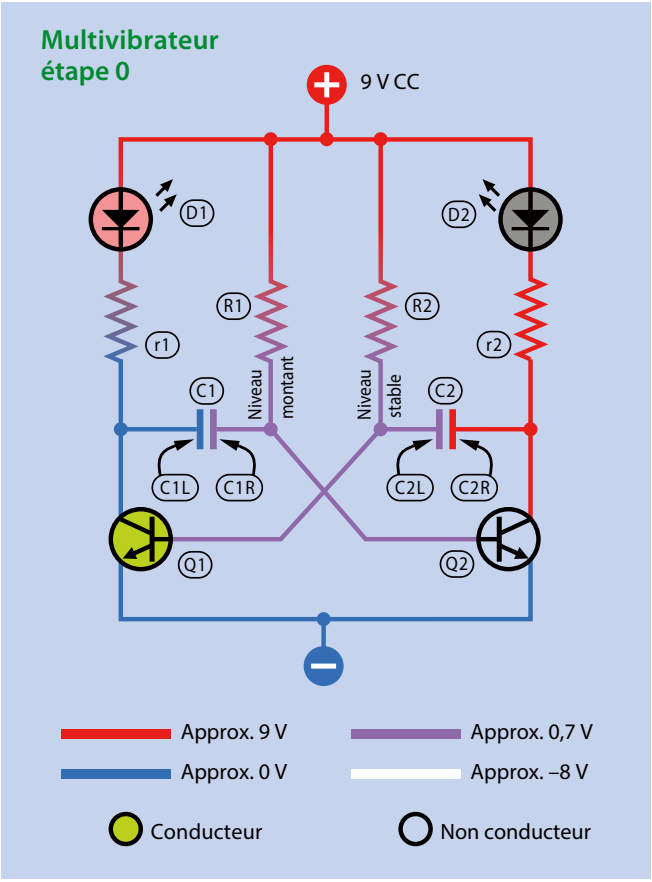


Figure 11-4. *État du circuit à la mise sous-tension.*

À l'étape 0, C1R et C2L ont disposé d'un peu de temps pour se charger au travers de R1 et R2, et leurs tensions sont égales, approximativement 0,7 V. Mais du fait des légères différences dans la fabrication des composants, aucun des composants n'est identique à un autre. Une résistance sera légèrement plus faible que l'autre, un condensateur se chargera en une fraction de temps plus faible que l'autre condensateur, et en ce cas, j'imagine que C2L a atteint la tension de 0,7 V légèrement avant C1R. C'est pourquoi, la connexion avec C2L est maintenant stable tandis que la tension de C1R « augmente ». Il en résulte que Q1 a permis au courant de le traverser, alors que Q2 bloque toujours le passage du courant. Vous comprenez ainsi, pourquoi une LED s'allume avant l'autre.

Q1 étant conducteur, la tension de son collecteur est presque aussi faible que celle de son émetteur. En conséquence, toute tension de C1L est absorbée par Q1. D1 s'éclaire quand le courant la traverse via r1, et jusqu'à la masse par Q1. L'état est stable.

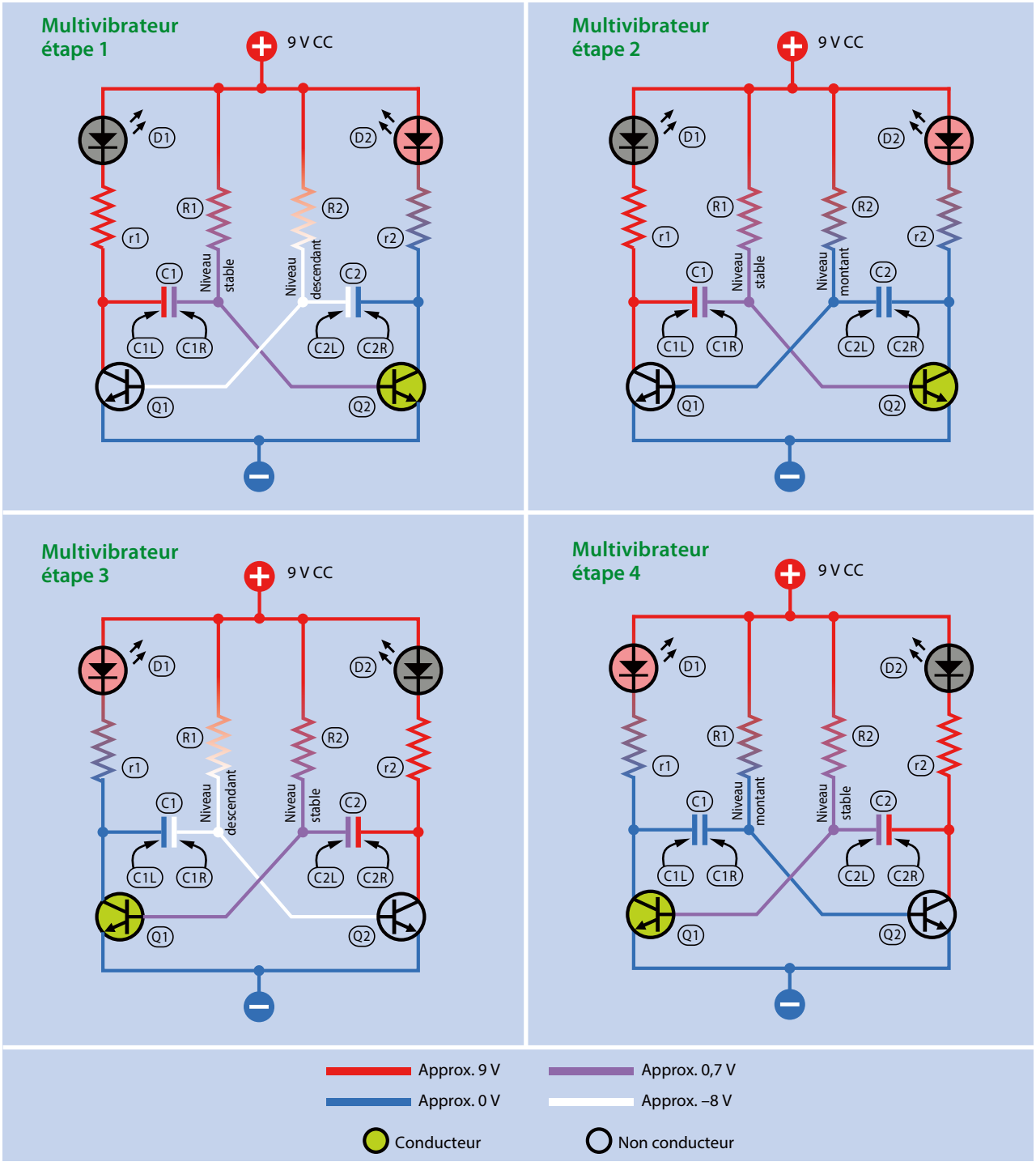
Dans la moitié droite du circuit, Q2 n'a pas encore commencé à conduire. La tension aux deux extrémités de D2 étant identique, la diode reste éteinte.

La mise en, fonctionnement est terminée, passons à l'étape 1, sur la figure 11-5. La tension de base de Q2 atteint finalement le niveau 0,7 V, le transistor commence à conduire. En conséquence, D2 n'est pas allumée, mais toute la charge de C2R est absorbée par Q2. Quand on change rapidement la tension à une extrémité d'un condensateur, l'autre terminaison change presque autant, en raison du déplacement de courant. Ceci s'applique quand la tension augmente rapidement (comme vous l'avez vu dans l'expérience 9), ou quand elle chute brutalement. Ici C2R est passé de 9 V à presque 0 V ce qui a causé une chute de la tension de C2L d'une valeur identique, de 0,7 V à environ *moins* 8 V. Bien, mais comment peut-on obtenir une tension négative ?

C'est facile ! Dans votre pile, 9 V est la *différence* de tension entre ses deux bornes, limitée par les réactions chimiques. Il est pratique de désigner la borne positive 9 V et la borne négative 0 V, mais cela signifie simplement qu'il y a davantage d'électrons du côté de la borne négative. Il s'agit d'une *différence de potentiel*. Cela ne veut en aucun cas dire que la borne 0 V d'une pile est le « point le plus négatif » qui puisse exister.

C2L étant relié à la base de Q1, la chute de tension soudaine de C2L influence le transistor et bloque sa conduction. Une charge positive s'accumule sur C1L, car elle ne peut maintenant aller nulle part ailleurs. Quand ce processus est terminé, D2 a une tension égale à ses deux extrémités, et elle s'éteint.

Cela met fin à la première étape de la séquence.



Figures 11-5, 11-6, 11-7 et 11-8. *Étapes fonctionnelles du multivibrateur astable.*

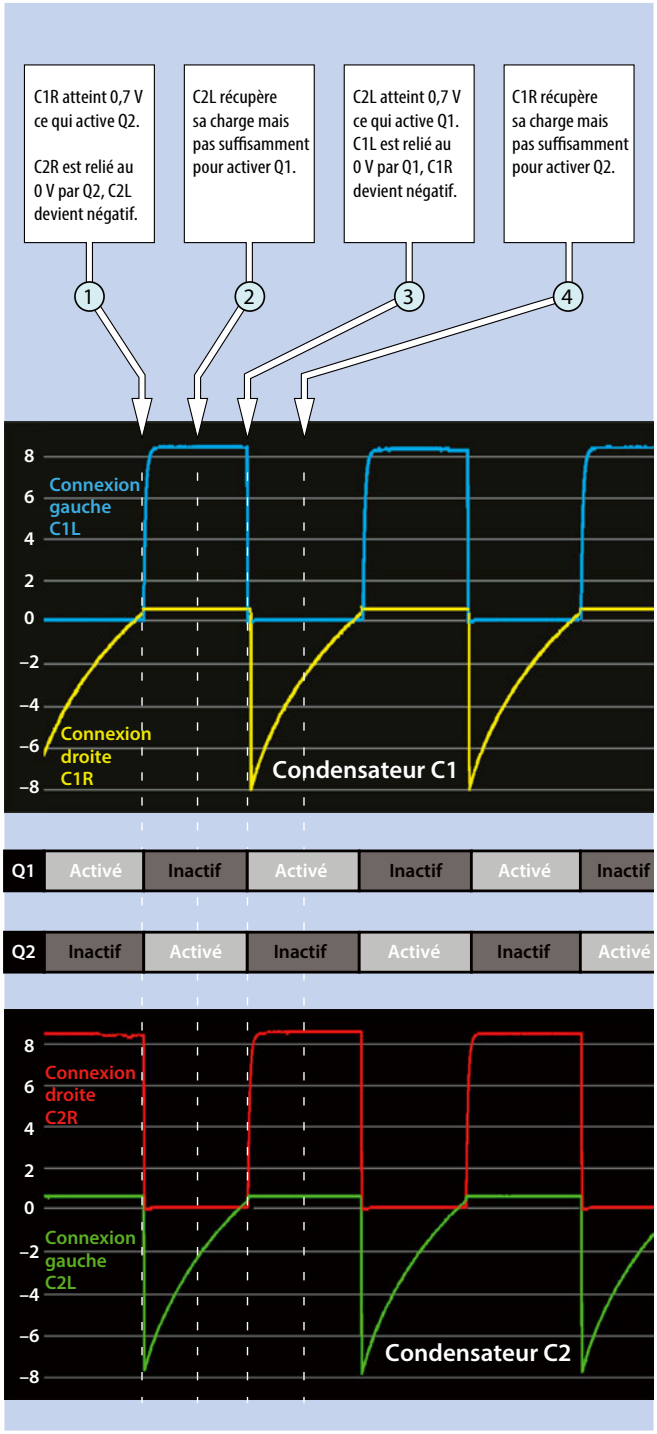


Figure 11-9. *Oscillogrammes du fonctionnement du circuit clignoteur.*

Dans l'étape 2, un quart de seconde plus tard, tout est identique du côté gauche du circuit, mais du côté droit, C2 élimine lentement la charge négative qu'il vient de stocker. Le courant a traversé C2L au travers de R2, ainsi, la tension de C2L passe de –8 V à environ 0 V, cette tension augmente mais n'est pas suffisante pour rendre Q1 conducteur. Vous le constaterez dans l'étape suivante.

Dans l'étape 3, la tension de C2L est finalement revenue à 0,7 V ce qui active le passage du courant dans Q1. Cela évacue la charge positive de C1L vers la masse, c'est maintenant au tour de C1 de devoir supporter une perte de tension importante. C1R atteint la tension d'environ –8 V, ce qui rend Q2 inactif, la situation de l'étape 3 est l'image miroir de celle de l'étape 1.

Dans l'étape 4, C1R récupère, sa tension remonte à 0 V ce qui n'est pas encore assez pour réactiver Q2, mais elle va rapidement atteindre 0,7 V, et la séquence va revenir à l'étape 1.

Vous voyez que le concept de déplacement de courant est essentiel ici. Comme personne ne le mentionne, je pense que c'est la raison principale d'incompréhension de ce circuit.

Je dois juste préciser un point, j'ai simplifié la situation en décrivant comment le circuit commence à clignoter. Avant le premier clignotement visible, un oscilloscope montre que quelques fluctuations se produisent, trop rapides pour que l'on puisse le voir avec les LED. Les condensateurs se chargent tour à tour jusqu'à ce que l'un d'entre eux atteigne finalement la tension de 9 V. Néanmoins, le principe de base du circuit reste identique à ce que j'ai décrit.

Les chiffres

La compréhension de l'électronique serait beaucoup plus facile si les fils étaient transparents et les électrons des petits points bleus visibles s'y déplaçant. Malheureusement, cela n'est pas le cas, mais un oscilloscope peut révéler ce qui se passe. Votre multimètre prend environ une seconde pour afficher une tension ; par contre, un oscilloscope montre ce qui se passe plusieurs milliers de fois par seconde (voire davantage).

Celui que j'utilise ne possède que deux sondes, j'en ai relié une à C1L et l'autre à C1R, puis à C2L, et enfin à C2R,

enregistrant une série d'oscillogrammes. J'ai ensuite assemblé les images dans Photoshop pour créer la figure 11-9.

Chacune des courbes de cette figure montre la tension à l'une des connexions d'un condensateur, et vous pouvez voir que les étapes numérotées précédemment de 1 à 4 correspondent aux flèches numérotées et aux lignes en pointillés que j'ai ajoutées aux oscillogrammes de la figure 1-9.

À l'étape 3, remarquez la chute brutale de tension voisine de 9 V à environ 0 V sur la courbe bleue, portant la tension de C1R à –8 V comme je l'ai expliqué. Il se passe la même chose entre C2R et C2L.

Ces tensions négatives ont des implications intéressantes.

En premier lieu, vous pourriez vous demander comment les condensateurs électrochimiques sont utilisés. Rappelons-nous qu'un condensateur polarisé exige que le potentiel d'une de ses connexions soit *relativement* plus élevé que celui de l'autre. Dans les oscillogrammes, vous pouvez voir que la courbe bleue est presque toujours à un potentiel plus élevé que celui de la courbe jaune, à l'exception d'un court instant où la tension jaune de C1R dépasse la tension bleue de C1L de 0,7 V. Cette situation dure une fraction de seconde. Les condensateurs électrochimiques tolèrent cela, si l'inversion ne dure pas longtemps et que la tension inverse est faible. En général, j'évite de forcer ainsi les condensateurs polarisés, mais dans ce circuit, je pense qu'il n'y a aucun problème.

Il y a également une raison pratique : ce circuit est si répandu, et depuis si longtemps, que j'aurais dû voir des personnes se plaindre d'avoir endommagé leurs condensateurs. Les gens ont pour habitude de se plaindre en ligne lorsqu'il se produit un événement de ce type !

Vous avez votre clignoteur, voyons maintenant comment on pourrait modifier sa sortie pour émettre un son audible ?

La fréquence

Pour générer un son, commençons par réaliser une copie de votre circuit clignoteur qui va fonctionner plus rapidement.

Vous pourriez changer la valeur de quelques composants du circuit déjà précédemment réalisé, mais je ne le souhaite pas car j'ai une idée pour le réutiliser. Je souhaite donc que vous en réalisiez une nouvelle version sous l'ancienne réalisation comme le montre la figure 11-10. La nouvelle version est imprimée en couleurs alors que j'ai grisé les composants de la version précédente.

Prenez la précaution de laisser un espace entre les deux circuits, sur votre plaque de montage, exactement comme je le montre dans mes illustrations, car dans l'étape suivante de ce projet, je vais installer quelques composants additionnels à cet emplacement. Vous remarquerez également que ce circuit est maintenant étendu à la partie inférieure de la plaque de montage, n'oubliez pas d'ajouter des fils de pontage pour relier les bus s'ils sont interrompus au centre de la plaque.

Le plan de montage du nouveau circuit sonore est pratiquement identique à celui de la version précédente, moins les LED. Les résistances de valeurs élevées, proches du centre de la plaque font maintenant 47K au lieu de 470 K, les condensateurs 10 nF au lieu de 1 µF.

L'élément rond situé en bas de la plaque de montage est un *haut-parleur* identique à celui utilisé précédemment sur la figure 6-26. Votre haut-parleur peut être plus grand que celui du plan, tant qu'il s'agit d'un modèle d'impédance 8 ohms Son diamètre importe peu dans ce montage.

La plupart des haut-parleurs ne sont pas polarisés, vous pouvez donc le connecter dans n'importe quel sens. Si l'un des fils de votre haut-parleur est rouge ou noir, c'est en général sans importance. Si votre haut-parleur possède des bornes de connexion, vous pouvez utiliser des fils de tests avec des pinces crocodiles pour le relier à l'aide de fils de pontage à votre plaque de montage.

Appuyez sur le bouton-poussoir, vous devriez alors entendre un son criard dans le haut-parleur. Ce son n'est pas très agréable, mais je vous promets de le rendre rapidement plus intéressant.

Le haut-parleur ayant une résistance apparente faible, j'ai ajouté une résistance de 100 ohms en série. Mais comme il nécessite une puissance supérieure à celle d'une LED, j'ai ajouté un autre transistor en bas du circuit pour le piloter. Le collecteur de ce transistor est relié à la tension d'alimentation par un fil de pont assez long, qui part du bouton et serpente jusqu'au transistor dont la base est reliée au fil de gauche du condensateur des 10 nF par une résistance de 10K et un fil de pontage vert. De cette façon, Q5 n'emprunte qu'un faible courant au condensateur, amplifie les impulsions du signal et les transmet au haut-parleur.

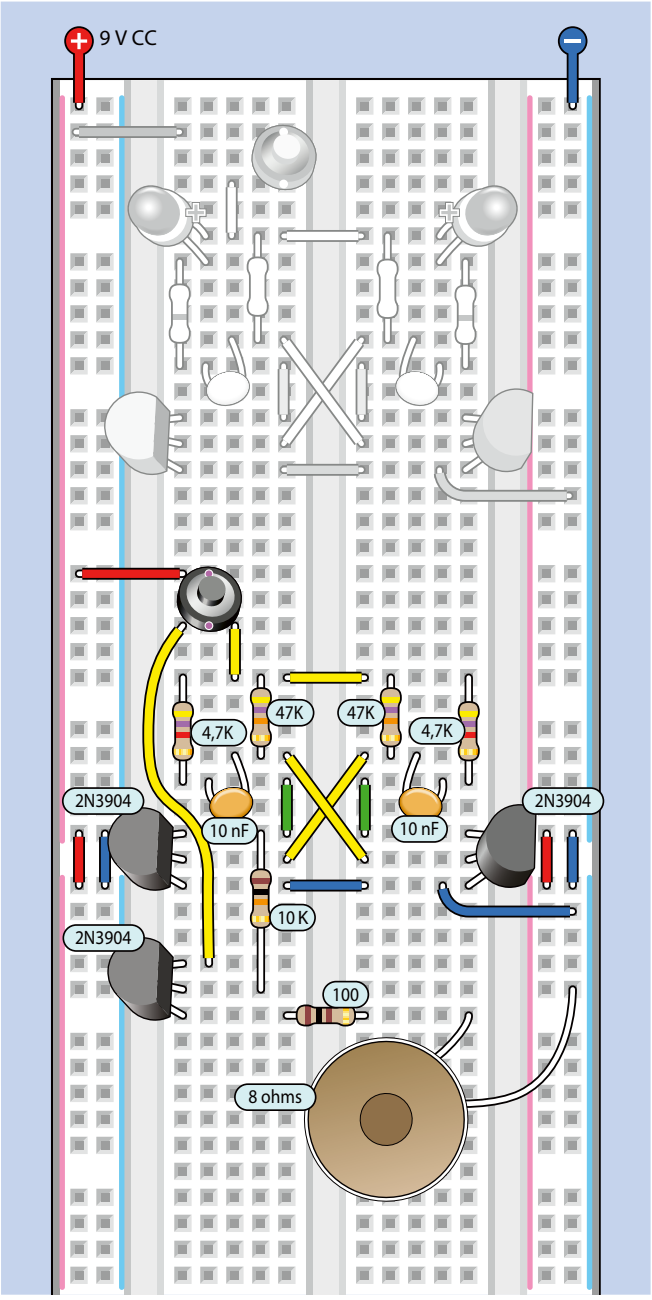


Figure 11-10. *La version sonore du circuit multivibrateur astable est implantée sous le circuit clignoteur.*

Un amplificateur audio conventionnel serait beaucoup plus complexe, mais pour cette application, un seul transistor amplifie le train d'impulsions, sans se préoccuper de la qualité du son. J'ai utilisé mon oscilloscope pour vérifier que le transistor n'avait pas besoin d'une résistance additionnelle pour limiter l'intensité du courant ou ajuster les niveaux des tensions.

Le haut-parleur contient un aimant et une bobine qui font vibrer sa *membrane*. Cela génère des ondes de pression de l'air que les oreilles perçoivent comme un son. Quelle sera la vitesse des vibrations ? Dans le circuit clignoteur, les valeurs de C1 et C2 étaient de 1 µF et celles de R1 et R2 de 470K. Les clignotements se répétaient à une cadence légèrement inférieure à une seconde. Dans la version audio du circuit, j'ai utilisé des résistances de 47K au lieu de 470K, et des condensateurs de 10 nF au lieu de 1 µF. Les résistances sont 10 fois plus faibles que précédemment et les condensateurs 100 fois. De ce fait, puisque 10 × 100 = 1 000, le circuit est 1 000 fois plus rapide. Mon multimètre a mesuré 1 700 impulsions par seconde ce qui produit le son diffusé par le haut-parleur.

Le haut-parleur consommant une puissance supérieure à celle des LED, votre pile de 9 V va s'épuiser rapidement si vous utilisez le circuit trop longtemps. Dans le chapitre suivant du livre, je vais vous suggérer d'utiliser un adaptateur CA qui se branche dans une prise de courant et délivre une tension de 9 V CC, néanmoins, la pile convient pour des tests.

Fondamentaux : le hertz

Le nombre d'impulsions par seconde est appelé la *fréquence*, elle se mesure en *hertz* dont l'abréviation est Hz. Cette unité internationale est ainsi appelée en hommage à Heinrich Hertz qui était également un pionnier en électricité. Si vous avez une impulsion toutes les secondes, sa fréquence sera de 1 Hz, un signal de 1 000 impulsions par seconde aura une fréquence de 1 000 Hz soit 1 kilohertz (qui s'écrit 1 kHz), et 1 000 000 d'impulsions par seconde auront une fréquence de 1 Mégahertz (noté 1 MHz). La lettre **H** est en majuscule car elle fait référence au nom d'une personne, alors que la lettre **M** est en majuscule car en minuscule **m** signifierait « milli » au lieu de « méga ».

Un LED ne peut pas réagir suffisamment rapidement pour visualiser une variation de 1,7 kHz, même si elle le pouvait,

votre œil ne verrait pas les clignotements. En raison de la *persistance rétinienne*, les clignotements supérieurs à 30 Hz seront confondus en une illumination continue. Il en va différemment de l'oreille humaine qui peut entendre des sons de fréquence comprise entre 40 Hz et 15 kHz (pour certaines personnes, la limite supérieure peut être réduite à 10 kHz ; en particulier pour ceux qui ont assisté à de nombreux concerts de rock durant leur jeunesse).

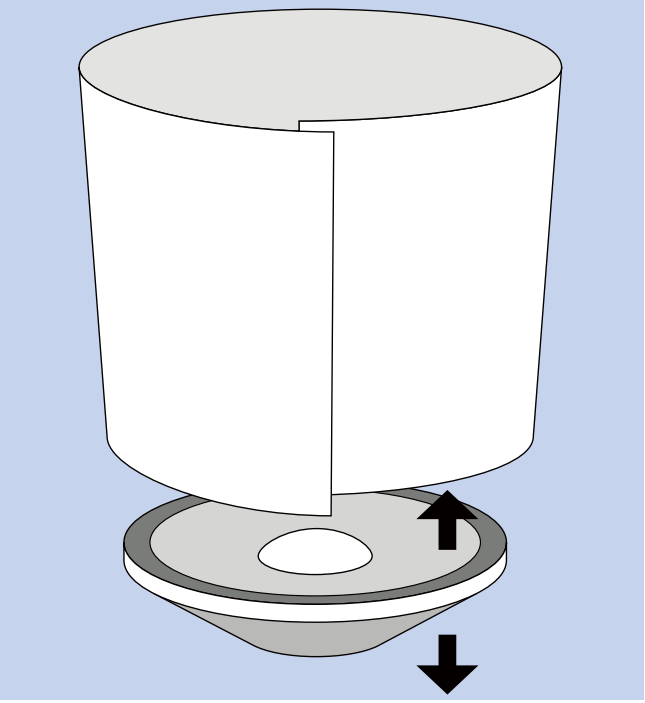


Figure 11-11. *Ajout d'un cylindre en papier pour renforcer la diffusion du son par un haut-parleur. Les flèches indiquent les vibrations de la membrane.*

Installation d'un haut-parleur

La membrane d'un haut-parleur s'appelle parfois son cône. Sa surface frontale est conçue pour permettre le rayonnement du son, mais sa face arrière génère également des ondes sonores et puisque les deux ondes sont en opposition de phase, elles ont tendance à s'annuler mutuellement. Le son émis par un haut-parleur peut être perçu plus intensément en ajoutant un tube cylindrique pour séparer les ondes frontales et arrières. Pour un haut-parleur miniature, vous pouvez replier et scotcher une bande de papier autour, comme sur la figure 11-11.

Mieux encore, installez-le dans un coffret afin que la boîte absorbe le son provenant de l'arrière du haut-parleur. Dans le cadre de cette expérience, je ne parlerai pas des *enceintes à évents* ou des enceintes *bass-reflex*, mais vous pouvez rechercher ces termes sur Internet. Vous pouvez également acheter des petits haut-parleurs préinstallés dans un coffret, vous constaterez que le son émis est très différent du bruit généré par un haut-parleur nu posé sur votre table de travail.

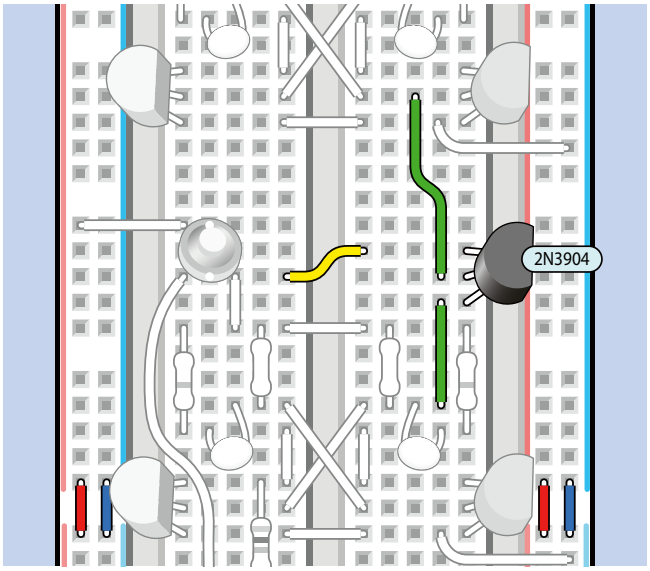


Figure 11-12. *Connexion des deux parties du circuit.*

Filtrage et gazouillis

Je vous ai promis de vous donner un son plus intéressant, imitant une alarme de voiture, faisons-le maintenant. Sur la figure 11-12, vous verrez que je vous demande d'ajouter deux fils de pontage verts, un jaune ainsi qu'un transistor supplémentaire pour relier le circuit de la partie haute de la plaque de montage au circuit de la partie inférieure.

Appuyez sur le bouton du bas : aucun changement. Appuyez sur le bouton en haut de la plaque : pas de changement. Maintenez appuyés simultanément les deux boutons : quelle surprise !

Le fil de pontage jaune que vous avez ajouté permet d'alimenter le nouveau transistor, sa base étant alimentée par le nouveau fil de pontage vert qui rejoint le condensateur de 1 µF. La tension de ce fil augmente graduellement jusqu'à 0,7 V, puis diminue brusquement à –8 V en raison du déplacement de courant. Ainsi, le nouveau transistor est commandé par cette tension qui fluctue curieusement, mais son émetteur est relié à un condensateur de 10 nF qui suit un cycle identique 1 000 fois plus rapidement. En vérifiant à l'oscilloscope, pour autant que je puisse le voir, le transistor qui réalise la liaison entre la partie supérieure de la plaque et sa partie inférieure ne semble pas être cruellement malmené.

Son rôle consiste à ***moduler*** le signal de 1,7 kHz du circuit sonore.

Vous vous demandez peut-être pourquoi je n'ai pas relié la partie haute du circuit et la partie basse par un simple fil de pontage ? En fait, j'ai essayé !

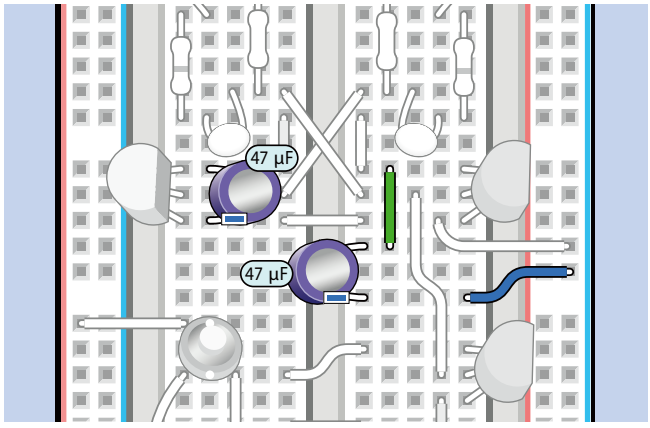


Figure 11-13. *Ajout des deux condensateurs de filtrage de 47 µF, celui de droite est connecté par un fil de pontage vert et un bleu.*

Je ne pensais pas que ça fonctionnerait, ce fut le cas, car la moitié inférieure du circuit ralentissait la moitié supérieure tandis que la moitié supérieure essayait d'accélérer la partie inférieure, et j'ai simplement obtenu une fréquence intermédiaire entre les deux. J'avais besoin d'un transistor pour prélever les fluctuations du circuit clignoteur et les ajouter aux variations du circuit sonore.

Il y a une autre modification que vous pouvez faire en option : ajoutez des condensateurs de filtrage au circuit clignoteur pour que sa sortie varie progressivement. La figure 11-13 vous montre comment. À gauche, un condensateur de 47 µF a été ajouté en parallèle avec le transistor de sortie. Un autre condensateur de 47 µF joue le même rôle à droite, mais faute de place j'ai dû le relier au transistor par un fil de pontage vert.

À ce stade, quand vous alimentez le circuit clignoteur (en laissant non alimentée la partie sonore pour l'instant), vous verrez les LED s'allumer et s'éteindre progressivement au lieu de le faire de façon abrupte.

Alimentez maintenant le circuit sonore, vous constaterez que le son a également été modifié.

La figure 11-14 montre une ultime modification, un condensateur de 10 nF est ajouté pour que le circuit imite le gazouillement d'un oiseau.

Le plan de la plaque de montage du circuit complet est sur la figure 11-15, et son schéma sur la figure 11-16. La figure 11-17 ne comporte que les composants à l'exclusion des connexions, sur un fond clair afin que vous puissiez voir les composants et leurs valeurs plus nettement. La liste des composants est ajoutée en bas de la figure.

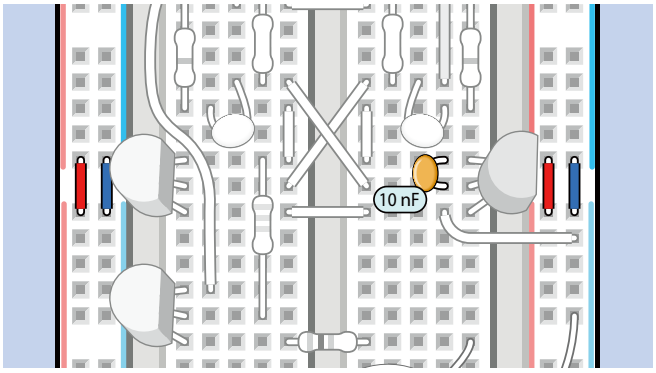


Figure 11-14. *Ajout d'un condensateur de 10 nF.*

Vous pouvez prolonger les essais par vous-même en changeant les différentes résistances et les condensateurs. Assurez-vous seulement que le rapport entre les valeurs des résistances identifiées par un R majuscule et celles identifiées par un r minuscule se situe entre 10 : 1 et 100 : 1. Le circuit ne fonctionnera pas de façon stable si ce rapport est trop élevé, car il doit demeurer inférieur au gain bêta des transistors 2N3904 qui se situe aux alentours de 200 : 1.

Options de sortie

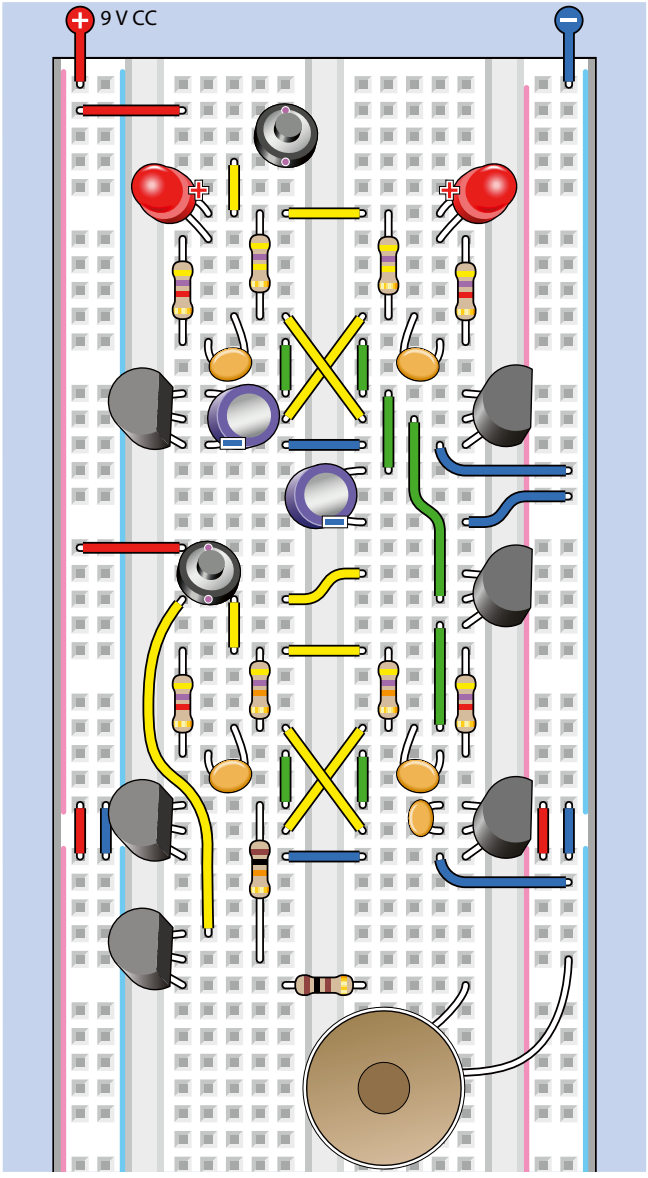


Figure 11-15. *Plaque de montage du multivibrateur astable terminée, comprenant toutes les options.*

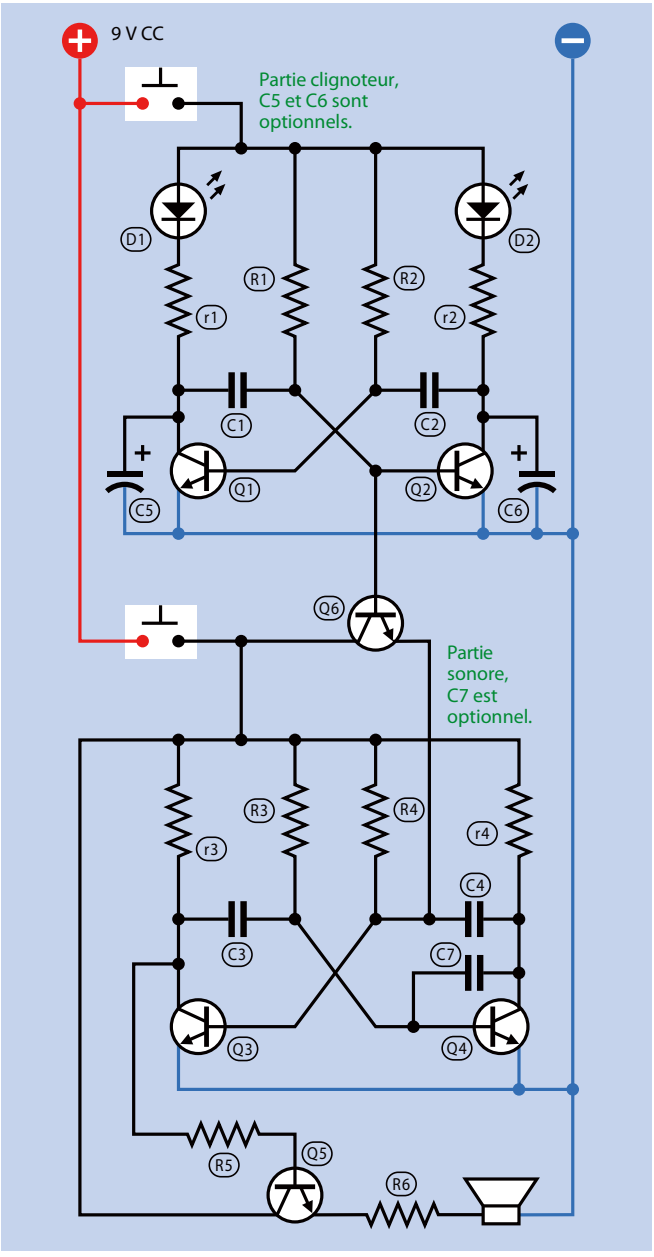
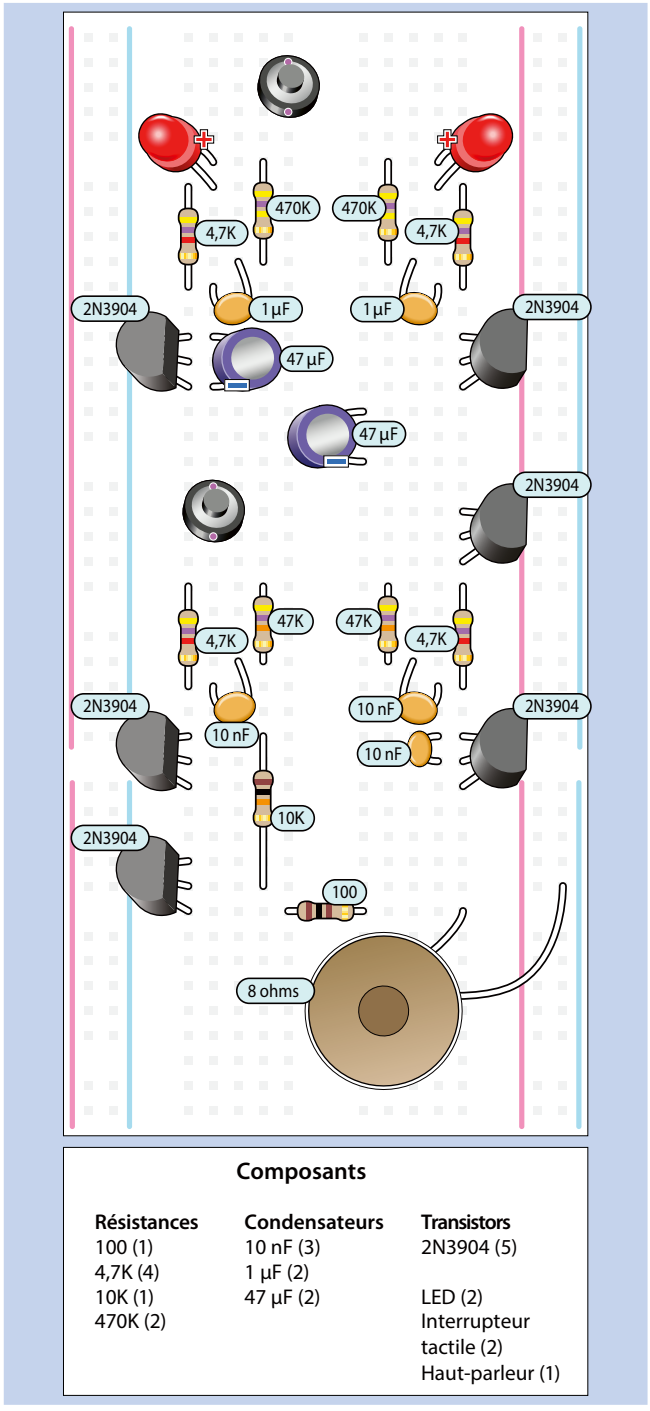


Figure 11-16. *Schéma du multivibrateur astable complet.*

Avant de clore le sujet sur les transistors, je dois décrire les deux options de base utilisées pour prélever leur signal de sortie. L'une s'appelle la configuration à *collecteur commun*, l'autre étant la configuration à *émetteur commun*.

Jusqu'à présent, j'ai utilisé l'option à collecteur commun. L'alimentation est appliquée directement au collecteur du transistor, la base et l'émetteur se partagent le collecteur qui leur est commun. C'est ainsi que je l'interprète.



Composants

Résistances	Condensateurs	Transistors
100 (1)	10 nF (3)	2N3904 (5)
4,7K (4)	1 µF (2)	
10K (1)	47 µF (2)	LED (2)
470K (2)		Interrupteur tactile (2)
		Haut-parleur (1)

Figure 11-17. *Cette vue ne montrant que les composants devrait vous aider à les placer avant de réaliser les connexions.*

Rendez-vous plus en avant sur la figure 11-19, mais avant d'étudier cela en détail, vous devriez entendre la différence.

Modifiez le circuit pour qu'il ressemble à celui de la figure 11-18. Le courant circule maintenant au travers de la résistance de 100 ohms, puis dans le haut-parleur, pour rejoindre le collecteur du transistor alors que son émetteur est relié directement à la masse 0 V. La base et le collecteur se partagent l'émetteur qu'ils ont en commun, il s'agit d'un circuit à *émetteur commun*.

En essayant ce circuit, vous remarquerez que le son est deux fois plus fort. Waouh, que s'est-il passé ?

La figure 11-19 simplifie ce circuit. Le transistor et sa charge sont en série dans les deux cas, mais dans la configuration à émetteur commun, la tension de commande s'écoule directement vers la masse par le transistor, alors que dans la configuration à collecteur commun, la tension de commande est séparée de la masse par la charge. Il s'agit là d'une différence fondamentale.

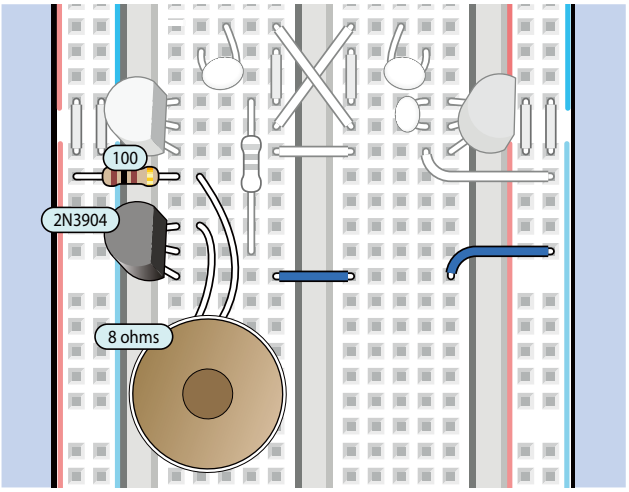


Figure 11-18. *Modification du circuit en mode émetteur commun.*

Sur la figure 11-20, vous voyez les valeurs que j'ai mesurées dans les deux versions du circuit multivibrateur. Dans la configuration à collecteur commun, la tension aux bornes du haut-parleur (et sa résistance série) variait entre 0 V et 5,6 V. Dans la configuration à émetteur commun, si on soustrait la sortie vers le haut-parleur de la tension à son autre extrémité, la variation est entre 0 V et 7,7 V. Pas de doute, le son est plus puissant !

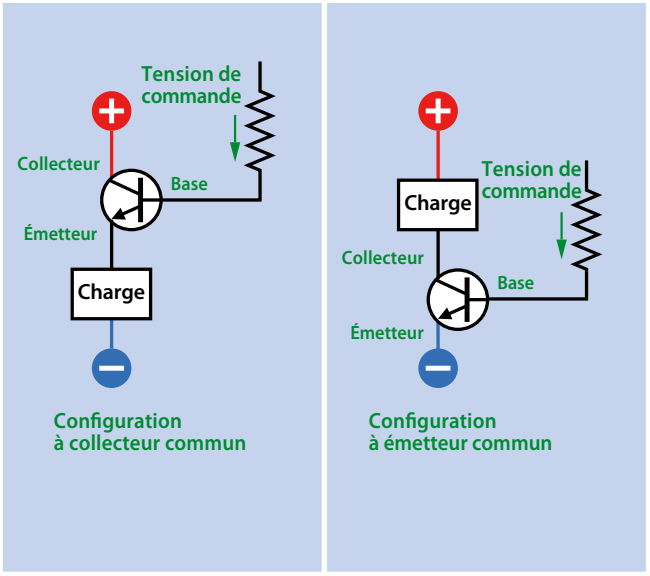


Figure 11-19. *Comparaison des circuits amplificateurs en mode collecteur commun et émetteur commun.*

La mesure de ces tensions était difficile car elles variaient plus de 1 000 fois par seconde. C'est cependant facile en réalisant un circuit dont la tension est constante comme sur la figure 11-21.

Dans ce circuit, une tension stable de 9 V CC est appliquée au transistor chargé uniquement par une résistance de 100 ohms, car il n'est pas recommandé de faire passer un courant continu dans un haut-parleur.

Bien que les résistances soient identiques dans les deux cas, la différence de potentiel aux bornes de la charge est de 5,9 V dans le circuit à collecteur commun, mais de 7,8 V dans la version à émetteur commun qui utilise, par contre, une puissance 50 % plus élevée.

Dans chaque cas, le courant traverse les mêmes composants. Mais selon une séquence différente. Pourquoi une telle différence ?

Je pourrais lancer la discussion à ce sujet, mais le cœur du problème est le changement de comportement des semi-conducteurs selon la tension qu'on leur applique. La résistance apparente d'un transistor NPN change radicalement selon la différence de potentiel existant entre la base et l'émetteur.

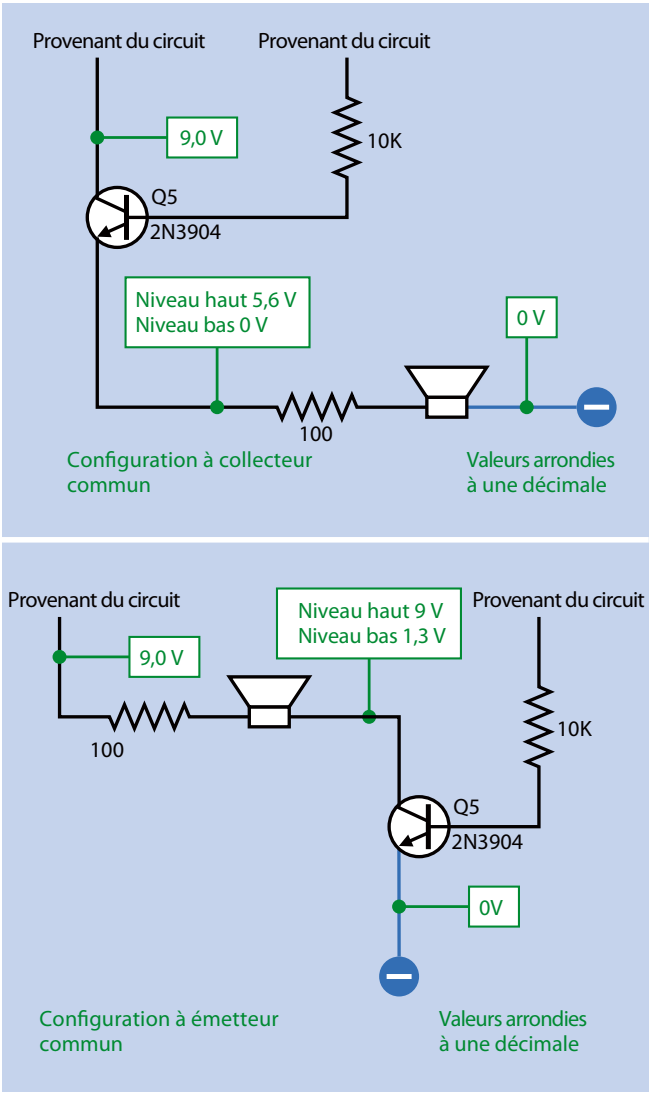


Figure 11-20. *Mesure des différences de tensions aux bornes du haut-parleur et de sa résistance dans le circuit multivibrateur.*

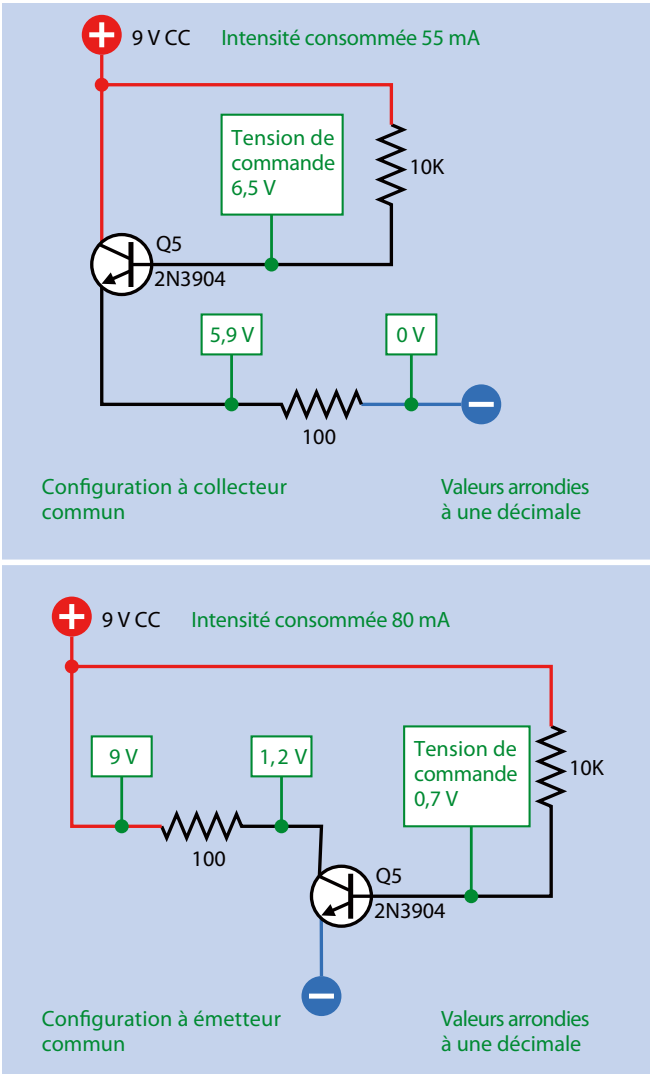


Figure 11-21. *Circuit de test permettant de mesurer des tensions continues dans les deux configurations.*

Je pourrais m'aventurer dans des domaines plus techniques que vous le souhaitez actuellement, mais le message à retenir est important.

- Il est possible d'extraire une puissance plus importante d'un transistor si vous l'utilisez en mode émetteur commun.

En ce cas, pourquoi ai-je initialement utilisé un transistor en mode collecteur commun dans le circuit multivibrateur ?

- Je considère que la version à collecteur commun est plus intuitive. Suspendre la charge à la sortie d'un transistor est plus sensé.
- Le son n'était pas aussi puissant, mais la consommation du circuit était nettement inférieure ce qui est important dans un circuit alimenté par une pile.
- Le câblage de la plaque de montage était plus simple.

Suite

Mon introduction générale concernant la commutation, les résistances, les condensateurs et les transistors est maintenant terminée. Vous avez la majorité des connaissances de base pour pouvoir réaliser toutes sortes de circuits, tels qu'un système d'alarme qui sera le prochain projet.

Avant de vous y rendre, je vais vous montrer comment réaliser des circuits plus durables en soudant leurs composants sur une plaque de montage perforée. Ensuite, j'utiliserai un circuit intégré temporisateur permettant de créer toutes sortes de circuits aux possibilités inattendues, puis j'utiliserai des circuits logiques pouvant compter et prendre des décisions.

Chapitre 3

Soudage

Voudriez-vous réaliser une version permanente d'un circuit que vous avez assemblé sur une plaque de montage ? Pour ce faire, vous devrez réimplanter vos composants et les relier par des petites gouttes d'un alliage métallique appelé *soudure*. Ce processus s'appelle le soudage, qui est plus facile à mettre en œuvre que sa prononciation. Bien que la soudure devienne très chaude, elle peut être appliquée en petites quantités de façon sécurisée.

Je vais vous guider en quelques étapes dans ce processus de soudage, et je vous montrerai comment réaliser une version du circuit clignoteur de l'expérience 11. Je vais aussi vous conseiller d'utiliser un adaptateur secteur CA comme source d'alimentation vous permettant de ne plus utiliser de piles jusqu'à la fin de ce livre. Cela sera utile pour certains circuits utilisant une puissance plus élevée que ceux que vous avez expérimentés jusqu'à présent.

- Voir l'annexe A pour prendre connaissance des informations concernant les composants, outils et fournitures.
- Consultez l'annexe B pour connaître les sources d'approvisionnement que je vous recommande, en ligne ou dans des commerces spécialisés.

Fer à souder

Un fer à souder est un outil en forme de stylo, de longueur 20 cm à 25 cm. Il n'est pas nécessaire d'acheter un modèle coûteux, le plus économique pourra convenir pour débuter. La question principale est : quelle est la puissance nécessaire ?

Un fer à souder de faible puissance, environ 15 W, est idéal pour les petits composants fragiles tels que les transistors et les LED qui peuvent être endommagés par une température trop élevée. Un fer de puissance moyenne, par exemple 30 West plus facile à utiliser car il permet de chauffer et faire fondre la soudure plus rapidement, mais il risque davantage d'endommager les composants. Idéalement, il faudrait vous procurer un fer de 30 W pour vous entraîner, et un fer de 15 W pour construire vos circuits. Si toutefois vous choisissez d'en acquérir un seul, prenez celui de 15 W.

J'ai vu des fers à double puissance, mais ils sont trop gros pour du travail minutieux.

Figure 12-1. *Fer à souder miniature convenant aux travaux minutieux avec des composants sensibles à la chaleur.*

Le type de fers à souder de la figure 12-1 est celui que je préfère, il est souvent appelé « fer miniature ». Lorsque vous devez réaliser des connexions espacées de 2,5 mm, vous le trouverez plus facile à utiliser qu'un fer de taille moyenne.

Si vous décidez d'acheter un fer à souder de 30 W, celui que je préfère est le fer Weller Therma Boost apparaissant sur la figure 12-2. Quand vous appuyez sur sa gâchette, il

renforce temporairement la température ce qui est utile si vous devez souder des fils de gros diamètre qui absorbent beaucoup de chaleur. Certaines personnes aiment le style en forme de pistolet, d'autres trouvent qu'il est plus difficile de les utiliser. Personnellement, je n'ai pas une opinion tranchée à ce sujet.

Une autre option est l'achat d'un fer à souder thermiquement contrôlé qui peut être soit un fer autonome muni de deux boutons de réglage de température, soit une « station de soudage » qui renferme une alimentation variable dans un boîtier qui se place sur votre table de travail. Je ne pense pas qu'il soit nécessaire de vous équiper d'une station de soudage pour apprendre à souder.

C'est à vous de décider du type de panne (pointe du fer) que vous préférez pour votre fer à souder. Une panne conique en pointe est précise mais ne transmet pas la chaleur très rapidement. Une panne plate, ressemblant à un tournevis plat est une alternative répandue. Certains fers sont vendus avec plusieurs pannes interchangeables vous permettant de choisir celle que vous préférez.

Figure 12-2. *Le Therma-Boost de Weller est pratique pour apprendre à souder et pour réaliser des connexions avec des gros fils de cuivre qui absorbent la chaleur.*

Le métal d'apport

Le métal d'apport ressemble à un fil nu, mais celui-ci fond autour des fils que vous souhaitez relier. La figure 12-3 montre quelques exemples de fils de soudure. Le fil de soudure fin de 0,5 mm à 1 mm de diamètre est le plus facile à utiliser avec des petits composants. Pour les projets de ce livre, un peu de fil de soudure (environ 1 mètre ou 15 grammes) sera suffisant.

Évitez d'acheter de la soudure destinée à la plomberie, ou aux activités manuelles comme la création de bijoux, car elle pourrait contenir un acide non compatible avec les circuits électroniques. La description du fil de soudure devrait contenir le mot « électronique » pour informer de sa compatibilité avec les circuits électroniques. De plus, il devra posséder une *âme de flux* (ou *résine*).

Il y a des controverses concernant l'utilisation de métal d'apport contenant du plomb. Certaines personnes ont le sentiment que cet ancien type de matériau permet de faire de meilleures soudures à plus basse température et ne comporte pas de risque pour la santé. Un ingénieur électronicien que je connais et qui travaille dans l'US Navy m'a même dit qu'il utilisait du métal de soudure contenant du plomb. Personnellement, je manque de connaissances pointues pour prendre position, mais je sais qu'en Europe, pour des raisons environnementales, l'utilisation de métal de soudure contenant du plomb est interdite.

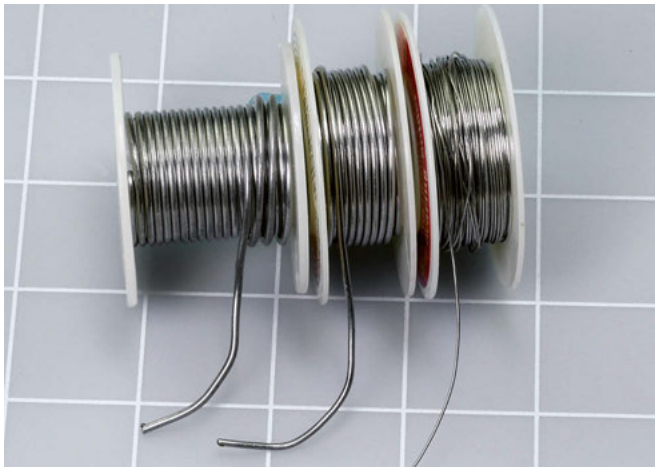


Figure 12-3. *Fils de soudure de différents diamètres.*

Terminologie et accessoires

De nombreux fers à souder sont décrits comme étant des *fers stylos*, mais cela n'est pas très informatif car il peut s'appliquer à un fer de 15 W ou de 30 W s'il est de taille réduite.

Les fers à souder sont fréquemment commercialisés avec un ensemble d'éléments auxiliaires, comme par exemple

différentes pannes, une bobine de soudure, un support pour le fer, ou un dispositif dit troisième main, qui permet le maintien des éléments que vous soudez. Je vous suggère de lire la suite de cette partie afin que vous puissiez décider si vous avez, ou non, besoin de ces accessoires. Si vous en avez besoin, faites une recherche en ligne pour voir si un kit correspondant à ce dont vous avez besoin existe. De cette façon, vous devriez faire quelques économies.

Figure 12-4. *Cette version de « troisième main » inclut un support de fer à souder en spirale, une éponge pour nettoyer la panne et une loupe.*

Essentiel : support de soudage

Souvent appelé « troisième main », ce dispositif possède deux pinces crocodiles pour tenir précisément en position les composants et morceaux de fil pendant que vous les soudez. Certains supports ont également une loupe et un support de fer à souder dans lequel vous pouvez reposer votre fer à souder, comme celui de la figure 12-4.

D'autres gadgets existent, permettant le maintien des fils et composants pendant leur soudure, et ils sont souvent plus sophistiqués que la bonne vieille « troisième main » qui utilise des articulations sphériques serrées par des écrous papillons. J'aime particulièrement les supports à quatre bras flexibles comme celui de la figure 12-5, mais ils sont relativement coûteux.

Figure 12-5. *Support à quatre bras flexibles.*

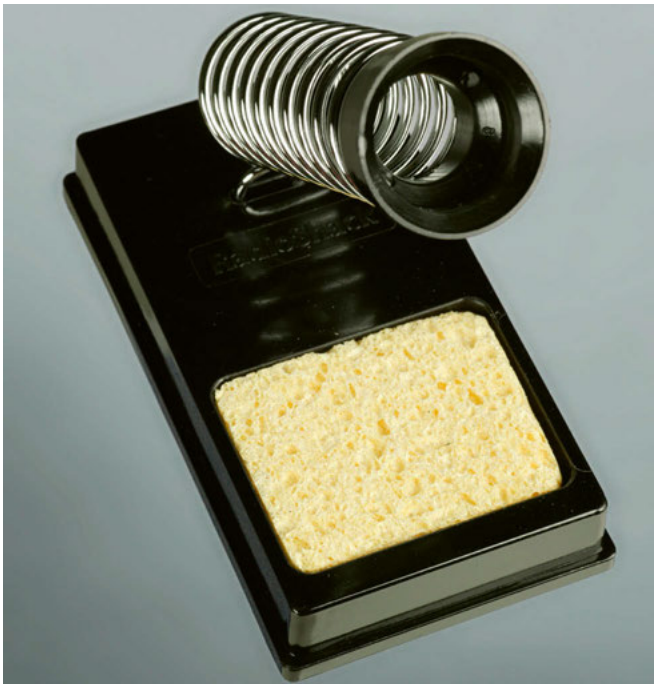


Figure 12-6. *Support de fer à souder traditionnel. L'éponge jaune permet de nettoyer la panne du fer.*

Faites une recherche en ligne avec « support troisième main ».

Pour voir les différentes options disponibles. Il est indispensable que vous ayez un moyen de maintenir les éléments que vous souderez.

Essentiel : support de fer à souder

Si vous souhaitez acquérir un support de fer traditionnel en spirale pour votre fer, il ressemblera à celui de la figure 12-6. Vous n'êtes absolument pas obligé d'en acquérir un, car vous pouvez utiliser un moyen alternatif, ou simplement poser votre fer sur le coin de votre table de travail, en vous promettant d'être *très, très prudent* pour ne pas le faire tomber. Si votre fer à souder tombe sur le sol, il pourrait faire fondre un revêtement en plastique ou la moquette. Sachant ce risque vous pourriez être tenté de le rattraper quand il tombe. Si vous le saisissez par la partie chaude, vous le laisserez rapidement continuer sa chute, vous feriez donc mieux de le laisser tomber en évitant de vous brûler.

Un support de fer est vraiment une meilleure idée à retenir.

Figure 12-7. *Pinces crocodiles en cuivre.*

Optionnel : pinces crocodiles en cuivre

Quand vous soudez les fils d'un composant fragile, la chaleur est conduite à l'intérieur du composant par ses fils de connexion et peut ainsi l'endommager. Je vous montrerai comment le vérifier en surchauffant une LED dans l'expérience 13.

Si vous êtes quelqu'un de précautionneux, vous souhaiterez placer une pince crocodile en cuivre juste au-dessus de l'endroit où se trouve votre fer à souder, afin d'absorber une partie de la chaleur.

Une pince crocodile en cuivre conduit la chaleur de façon plus performante qu'une pince en acier chromé comme celles de vos fils de tests, est-ce bien nécessaire ? Personnellement, j'aime les utiliser car je suis méticuleux. Si vous décidez d'acheter une paire de pinces crocodiles en cuivre, assurez-vous qu'elles soient en cuivre pur, pas en métal cuivré.

Figure 12-8. *Poire à vide permettant d'absorber la soudure en fusion.*

Optionnel : outils de dessoudage

Si vous faites une erreur de soudure, il n'y a pas de moyen de revenir en arrière ; par contre, vous pouvez utiliser une *pompe à dessouder* prévue pour absorber la soudure, maintenue en fusion avec votre fer tenu par l'autre main. J'ai des difficultés avec cette technique, mais je connais des gens qui l'utilisent. Voir la figure 12-8.

La *tresse à dessouder* est une alternative supposée absorber la soudure en fusion par capillarité. Voir la figure 12-9. Je mentionne ce moyen car une description du soudage serait incomplète sans en parler. Je ne trouve pas que cela soit très efficace.

Je connais quelqu'un qui utilise de la tresse à dessouder mais il dit que pour que cela fonctionne, il faut appliquer une chaleur plus importante que celle qu'un fer à souder de 15 W peut délivrer.

Figure 12-9. *Tresse à dessouder*

Essentiel : loupe

Quelle que soit la qualité de votre vision, une petite loupe portative est essentielle quand vous devez vérifier vos soudures.

Figure 12-10. *Ces trois loupes sont identiques, mais si vous en utilisez deux ou les trois simultanément, vous obtenez un grossissement plus important.*

L'ensemble de trois loupes de la figure 12-10 est conçu pour être tenu à proximité de votre œil et est beaucoup plus puissant que la loupe d'une troisième main que je trouve peu utile. Les loupes en plastique seront acceptables si vous en prenez soin.

N'oubliez pas que vous pouvez également vous servir de la caméra de votre smartphone en mode macro, qui vous servira de microscope portatif.

J'aime également me servir de loupes binoculaires telles que celles de la figure 12-11. Elles permettent de garder les mains libres, se déplacent avec vous, et du fait de la présence d'une loupe pour chaque œil, elles maintiennent la perception de la profondeur. Certaines de ces loupes, notamment celles utilisées par les dentistes, sont très coûteuses, mais pour vos besoins, vous pouvez vous procurer un modèle plus économique.

Figure 12-11. *Lunettes binoculaires.*

Optionnel : gaine thermorétractable

Quand vous avez relié deux fils en les soudant, il est souvent nécessaire d'isoler le point de jonction des fils. L'utilisation de *gaine thermorétractable* est le meilleur moyen d'y parvenir. Vous devez faire glisser la gaine jusqu'au point de soudure, puis appliquer de l'air chaud pour faire rétrécir la gaine qui maintiendra fermement les fils. La plupart des gaines thermorétractables, peuvent réduire leur diamètre de moitié par échauffement.

Un sachet ou une boîte contenant un assortiment de trois ou quatre diamètres réduits sera suffisant pour les projets

et exercices de ce livre. La couleur n'a d'intérêt que pour l'esthétique. Voir la figure 12-12.

Figure 12-12. *Gaine thermorétractable de diverses tailles et couleurs.*

Seul inconvénient de ces isolants, l'usage d'un pistolet à air chaud est recommandé.

Figure 12-13. *Pistolet à air chaud, grand modèle.*

Figure 12-14. *Petit pistolet à air chaud convenant aux travaux d'électronique pour rétrécir la gaine thermorétractable.*

Optionnel : pistolet à air chaud

L'utilisation principale de cet outil sera le rétrécissement des gaines thermorétractables. Une version grand modèle (parfois nommée décapeur thermique) est représentée sur la figure 12-13, mais c'est un modèle trop puissant pour les gaines thermorétractables. La version miniature de la figure 12-14 sera suffisante, et son jet d'air étroit permet un travail plus précis pour isoler les connexions que vous réalisez.

Figure 12-15. *Connecteurs rapides à écrous, choisissez le plus petit.*

Optionnel : autres moyens de connexion

Si vous ne voulez pas souder, quelle qu'en soit la raison, et que vous préférez éviter de dépenser de l'argent en gaine thermorétractable et pistolet à air chaud, vous devrez toutefois utiliser un moyen pour relier vos fils et les isoler, en particulier pour adapter l'alimentation dont je parlerai ensuite.

Votre magasin de bricolage vend des écrous pour relier des fils électriques qui sont largement utilisés dans les installations électriques des bâtiments. Pour des liaisons à faible tension, vous aurez besoin du modèle le plus petit permettant la connexion du fil de câblage de jauge 22. Voir la figure 12-15.

Il existe d'autres types de connecteurs rapides, peu importe votre choix pourvu qu'ils puissent relier des fils de 0,65 mm de diamètre (jauge 22).

Autre alternative, vous pouvez utiliser des dominos, comme ceux de la figure 12-16. Il s'agit de barrettes de plusieurs connecteurs, que vous pouvez couper selon la quantité dont vous avez besoin.

Comme vous n'aurez à réaliser que des connexions de faibles tensions, vous pouvez également torsader ensemble plusieurs fils dénudés et les isoler par du ruban adhésif pour électricien. Malheureusement, cette solution n'est pas très fiable dans le temps.

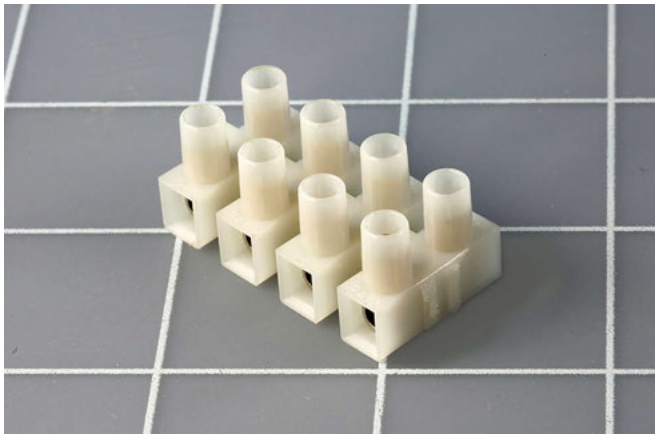


Figure 12-16. *Barrette de dominos.*

Optionnel : plaque d'expérimentation perforée

Lorsque vous serez prêt à réaliser une version définitive d'un circuit, vous aurez besoin d'un support sur lequel placer les composants avant de les souder. Pour cela vous utiliserez une *plaque de circuit imprimé perforée*, également appelée *plaque d'expérimentation perforée*.

Le modèle le plus pratique est composé d'une plaque comportant des languettes de cuivre selon une disposition identique à celle des connexions internes d'une plaque de montage. Cela vous permettra de minimiser les erreurs quand vous passerez d'une plaque de montage à la version définitive. Un modèle assez séduisant, présenté sur la figure 12-17, est commercialisé par Adafruit. Il se nomme *perma-proto*.

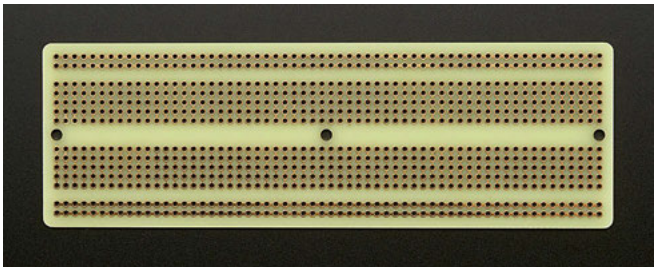


Figure 12-17. *Cette plaque perforée comporte des pistes de cuivre disposées comme les languettes internes d'une plaque de montage.*

L'inconvénient de ces types de plaques est leurs dimensions qui se prêtent difficilement à leur installation dans un petit coffret. Pour réduire la taille d'un circuit, vous pouvez utiliser des plaques perforées vierges comme celle de la figure 12-18, et réaliser un *câblage point à point*. Vous pouvez vous procurer des plaques de grandes dimensions, par exemple 20 cm × 15 cm, et les couper avec une petite scie à métaux, selon vos besoins. (La fibre de verre des plaques perforées aurait tendance à émousser une scie à bois.) Je vous montrerai l'utilisation d'une de ces plaques dans l'expérience 14.

Il existe également des plaques perforées comportant des pistes de cuivre de différentes configurations que certains

préfèrent : par exemple, les plaques comportant des pistes parallèles qui peuvent être découpées à l'aide d'un canif ou d'un cutter afin d'interrompre une liaison.

Ceux qui ont l'habitude de souder ont une préférence pour tel ou tel type de plaque, mais je pense que vous devrez d'abord être habitué à faire des soudures avant d'envisager votre choix.

Optionnel : coffrets de montages

Il s'agit de petites boîtes (habituellement en plastique, parfois en aluminium) avec un couvercle détachable. Comme son nom l'indique ce boîtier est prévu pour contenir vos montages de projets électroniques. Vous montez tout d'abord vos interrupteurs, LED et potentiomètres dans des trous que vous devrez percer dans le couvercle, puis vous fixez votre circuit ainsi réalisé sur une plaque perforée qui s'insère dans le boîtier. Il existe également des coffrets prévus pour le montage d'un petit haut-parleur. Un petit coffret est montré sur la figure 12-19.

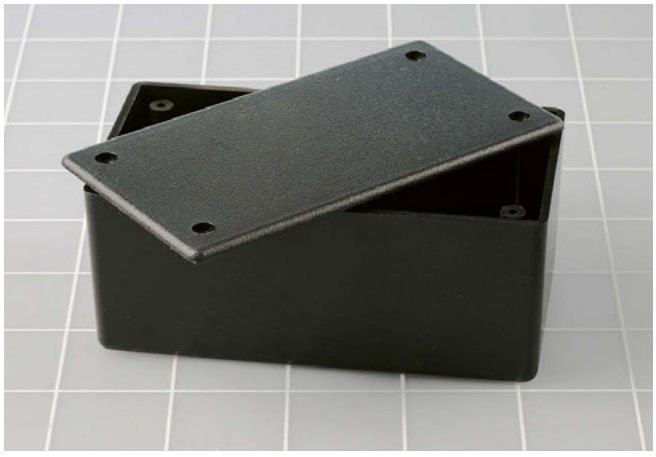


Figure 12-19. *Petit coffret de montage comportant des vis pour fixer son couvercle.*

Vous trouverez des dizaines de boîtiers différents en cherchant : « coffret électronique ».en ligne.

Pour le projet d'alarme électronique d'intrusion que je vous propose dans l'expérience 15, vous devrez utiliser un coffret d'environ 15 cm de long, 8 cm de large et 5 cm de profondeur.

Optionnel : pinces à crochets

Dans les expériences précédentes, je vous ai conseillé de relier vos cordons de mesure avec une pince crocodile et de connecter son autre extrémité à un fil de test ou à un composant.

Si vous voulez garder vos deux mains libres lors de vos mesures, il existe une manière plus pratique consistant à utiliser des *pinces à crochets* munies d'un crochet à ressort à leur extrémité, comme sur la figure 12-20.

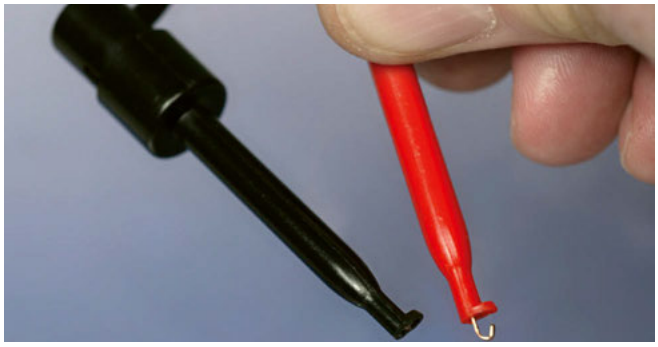


Figure 12-20. *Cordons de mesure équipés de pinces à crochets*

Des cordons de mesure se terminant par des petites pinces crocodiles comme ceux de la figure 12-21, sont également disponibles, mais vous pouvez continuer à utiliser les cordons de mesure comme précédemment. Rappelez-vous que des cordons de mesure courts conviennent mieux aux projets sur plaque de montage.

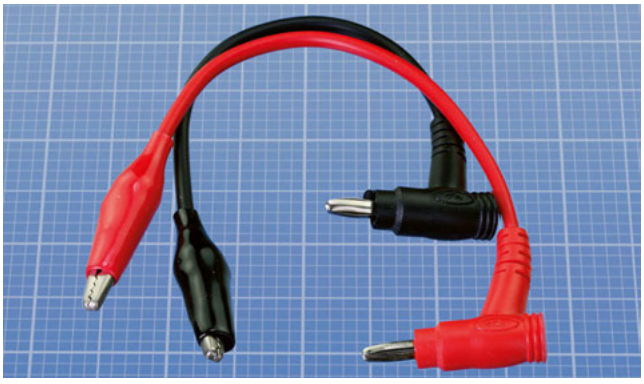


Figure 12-21. *Cordons de mesure équipés de pinces crocodile miniatures.*

Essentiel : alimentation secteur

J'ai gardé le plus important pour la fin, un adaptateur secteur CA qui se branche sur une prise de courant et délivre une tension continue CC par un câble de sortie que vous pouvez relier à votre plaque de montage. Un adaptateur 9 V CC est montré sur la figure 12-22.

Si vous envisagez de continuer la réalisation de circuits, l'achat d'un adaptateur secteur vous permettra d'économiser, comparativement au coût des piles à utiliser. De plus, la plupart des adaptateurs permettent de délivrer une puissance supérieure à celle d'une pile de 9 V.

Vous pouvez acquérir un adaptateur délivrant une tension unique, ou un adaptateur universel comportant un bouton de réglage de la tension de sortie. Cela semble être intéressant, mais en fait ces adaptateurs sont un peu plus coûteux, et ne délivrent pas une tension correctement régulée.

Figure 12-22. *Adaptateur secteur*

« Correctement régulé » signifie que la tension délivrée par l'adaptateur doit être stable quelle que soit l'intensité consommée et être filtrée. C'est important car le chapitre 4 mettra en œuvre des circuits intégrés logiques sensibles aux pics de tension. Je conseille d'utiliser un adaptateur délivrant une tension fixe de 9 V CC, il serait préférable de vous le procurer auprès d'un fournisseur de matériel électronique comme Mouser electronics par exemple.

La figure 12-23 montre un oscillogramme de la tension délivrée par un adaptateur de bonne qualité.

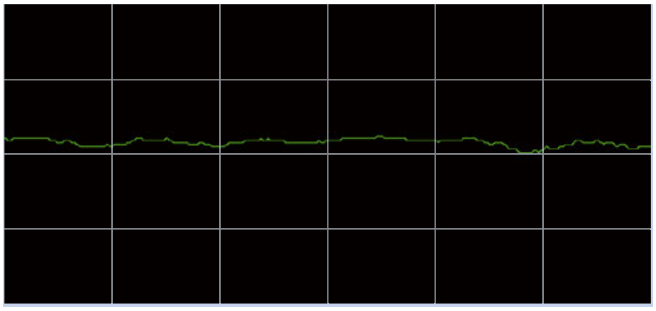


Figure 12-23. *Tension de sortie correcte issue d'un adaptateur secteur.*

Vous pouvez apercevoir des petites variations sur la trace, mais elles se situent dans une plage d'environ 0,02 V. La tension moyenne est plus proche de 8,6 V que de 9 V, mais la trace a été obtenue alors que l'adaptateur délivrait un courant de 300 mA sur une charge de 25 ohms. Une tension de 8,6 V convient pour les projets de ce livre.

La figure 12-24 montre la sortie d'un adaptateur de mauvaise qualité.

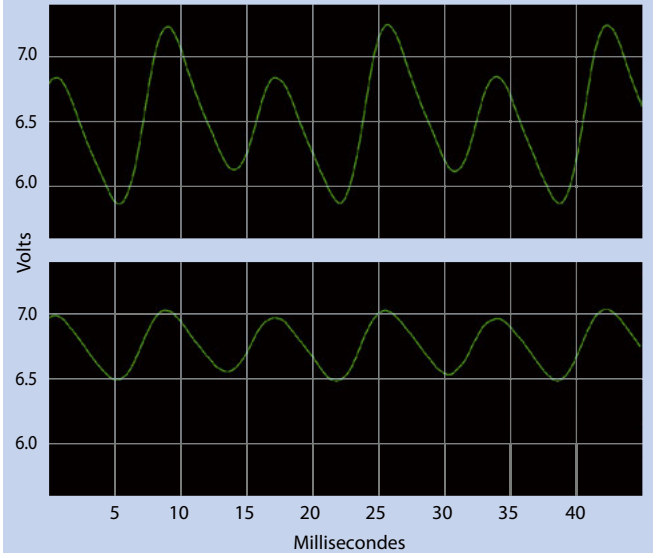


Figure 12-24. *La sortie de cet adaptateur n'est pas acceptable. La trace inférieure a été obtenue en ajoutant un condensateur de filtrage de 47 µF.*

La sortie correspondant à la trace inférieure a été améliorée par l'ajout d'un condensateur de filtrage de 47 µF, mais elle demeure inacceptable. Lors de l'achat d'un adaptateur secteur, je vous conseille de réfléchir par deux fois avant de choisir le modèle le moins coûteux que vous pourriez trouver sur eBay.

Quelques points à garder en mémoire lors de l'achat d'un adaptateur secteur :

- Un adaptateur bon marché ne pourrait pas être correctement protégé en cas de surcharge, ou court-circuit.
- Assurez-vous qu'il délivre une tension continue CC et non alternative CA. Presque tous les adaptateurs délivrent une tension continue, mais il existe quelques exceptions.
- Cherchez un adaptateur pouvant délivrer 300 MA (ou 0,3 A).
- Peu importe le type de connecteur équipant son câble de sortie, vous devrez couper ce câble pour pouvoir le relier à votre plaque de montage. Je vous montrerai comment faire.
- Certains adaptateurs sont parfois dénommés prise alimentation secteur ou alimentation secteur ou bloc chargeur dans leurs descriptions.

Ce sujet termine ma liste des informations relatives à la réalisation de circuits permanents. Il est maintenant temps d'en venir à l'étude du processus de soudage.

Expérience 12
Relier deux fils ensemble

Votre aventure dans l'univers de la soudure commence par une tâche simple consistant à relier ensemble deux fils, mais débouchera rapidement vers la création de circuits sur une plaque perforée.

Ce dont vous aurez besoin :

- du fil de câblage, 1 pince coupante, 1 pince à dénuder
- votre fer à souder. Je suppose, si vous en possédez un, qu'il a une puissance de 15 W. Si vous possédez également un fer de puissance 30 W, celui-ci facilitera votre apprentissage de la soudure
- 1 « troisième main » ou tout dispositif permettant de maintenir votre travail par des pinces crocodile
- en option, un peu de gaine thermorétractable de diamètre 3 à 6 mm
- en option, 1 pistolet à air chaud
- en option, un morceau de carton épais ou de contreplaqué, pour protéger votre table de travail des projections de soudure

Attention : un fer à souder devient très chaud !

Le fer à repasser que vous utilisez pour repasser vos chemises est à vrai dire plus dangereux qu'un fer à souder, car il a une plus grande capacité de production de chaleur. Néanmoins, vous devez être prudent quand vous soudez.

Merci de prendre les précautions suivantes :

- Utilisez un support de fer adéquat pour le reposer. Ne le laissez pas sur votre plan de travail.
- Si vous avez des enfants ou des animaux, rappelez-vous qu'ils pourraient jouer ou attraper le cordon de votre fer à souder. Ils pourraient se brûler (ou vous brûler).

- Faites attention de ne pas mettre la panne de votre fer en contact avec son cordon d'alimentation. Il pourrait faire fondre son isolant en plastique en quelques secondes et créer un court-circuit dangereux.

- Si votre fer vous échappe des mains, *ne jouez pas les héros* en essayant de le rattraper.

La plupart des fers à souder possèdent un voyant lumineux vous indiquant s'ils sont branchés. En règle générale, considérez qu'un fer à souder peut être très chaud, même non relié au secteur électrique. Il peut rester suffisamment chaud pour provoquer une brûlure plusieurs minutes après avoir été débranché.

Dans la mesure du possible, il est préférable d'éviter de respirer la fumée émise par un fer à souder. Travailler dans un local aéré est recommandé.

Votre première soudure

Branchez votre fer à souder, et attendez quelques minutes en le laissant dans son support. Si vous l'utilisez sans lui laisser le temps de devenir suffisamment chaud, vous ne ferez pas de bonnes soudures, car la soudure n'aura pas suffisamment fondu. Ne croyez pas les fabricants qui annoncent qu'un fer à souder est prêt en une minute, voire moins.

Préparez deux morceaux d'au moins 5 cm de fil monobrin de jauge 22 aux extrémités dénudées. Maintenez-les avec votre troisième main afin qu'ils se touchent en se croisant, comme sur la figure 12-25.

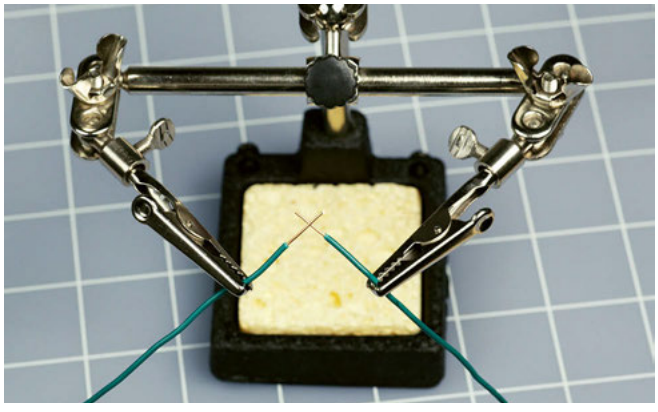


Figure 12-25. *Prêt pour votre première soudure.*

Figure 12-26. *Une des possibilités de nettoyage de la panne d'un fer à souder. Agitez le papier froissé rapidement afin d'éviter de le carboniser.*

Pour être sûr que votre fer est prêt, mettez un morceau de fil de soudure en contact avec la panne, celui-ci devrait fondre instantanément. Si la soudure fond lentement, le fer n'est pas encore assez chaud, ou la panne est encrassée et devrait être nettoyée.

Beaucoup de personnes nettoient la panne d'un fer à souder à l'aide d'une éponge comme celle qui est peut-être incluse dans le support de fer. Humidifiez l'éponge sans excès, puis frottez la panne de votre fer. Personnellement, je préfère ne pas faire cela car l'humidité sur la panne crée des écarts de température qui pourraient provoquer des petites fêlures sur le placage de la panne.

J'utilise une méthode assez primitive : je chiffonne un morceau de papier en forme de balle et l'utilise pour frotter l'extrémité de la panne du fer à souder, suffisamment rapidement pour que le papier ne soit pas carbonisé, et en prenant soin de ne pas brûler mes doigts. Ne frottez jamais la panne d'un fer à souder avec quoi que ce soit de plus abrasif que du papier.

Suivez maintenant les quatre étapes pour réaliser votre soudure, selon les figures 12-27 à 12-30.

Étape 1 : mettez la panne tenue immobile en contact avec l'intersection des fils pendant au moins cinq secondes afin de les chauffer. N'appliquez pas encore le métal d'apport !

Étape 2 : déposez un peu de métal d'apport à l'intersection des fils, tout en les maintenant en contact avec le fer à souder. Les deux fils, le métal d'apport et la panne du fer à souder doivent se trouver ensemble au point de soudure.

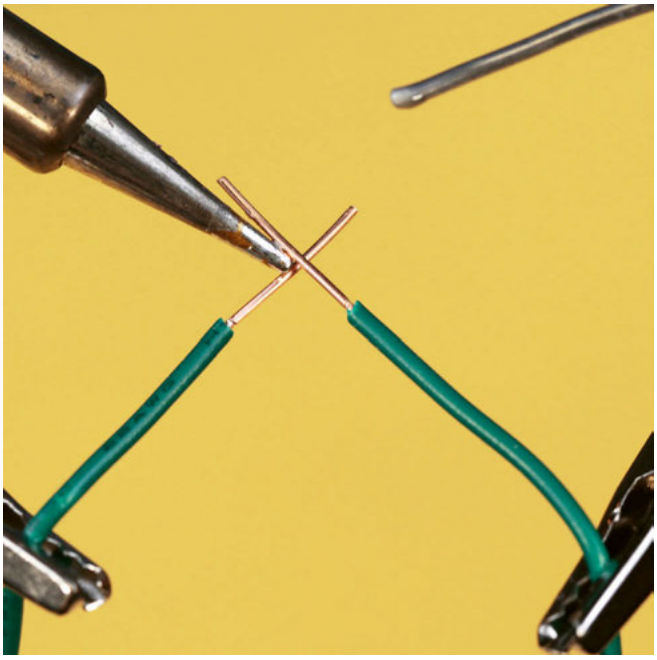


Figure 12-27. *Étape 1 : chauffage des fils.*

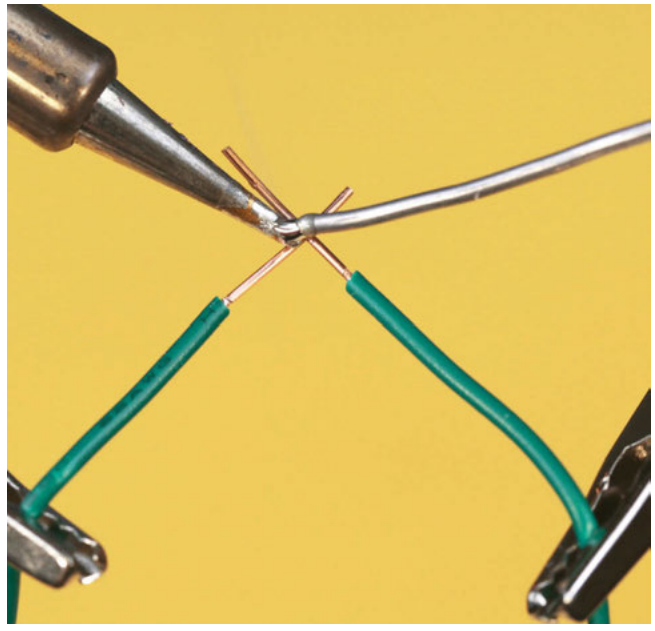


Figure 12-28. *Étape 2 : ajout du métal d'apport.*

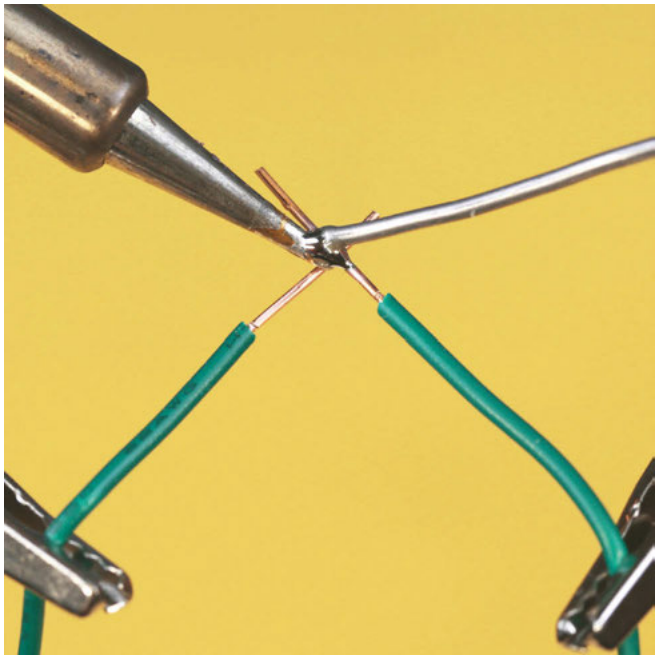


Figure 12-29. *Étape 3 : la soudure commence à s'écouler au point de jonction.*

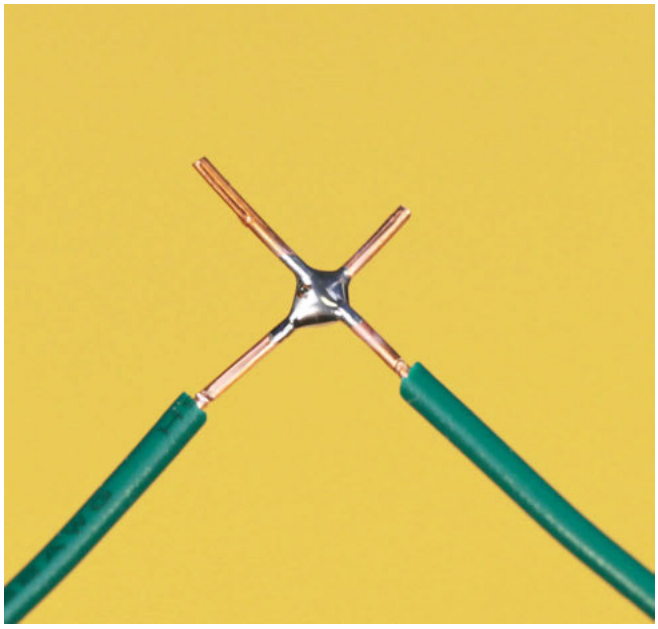


Figure 12-30. *Le métal d'apport forme une goutte brillante qui s'accroche aux fils.*

Étape 3 : le métal d'apport commence à fondre lentement. Soyez patient.

Étape 4 : sur la figure 12-30, vous voyez que le métal d'apport forme une goutte brillante. Si vous soufflez dessus pour la refroidir, vous devriez pouvoir la toucher au bout de 10 secondes environ. La soudure doit être propre, brillante et de forme ronde.

Quand la soudure est refroidie, détachez les fils et essayez de les séparer en tirant dessus. Forcez ! S'ils résistent malgré vos efforts, les fils sont électriquement reliés et le resteront. Si votre soudure n'est pas correctement réalisée, vous pourrez les séparer facilement, probablement parce que vous n'avez pas assez chauffé les fils ou mis trop peu de métal d'apport. La figure 12-31 illustre cela.

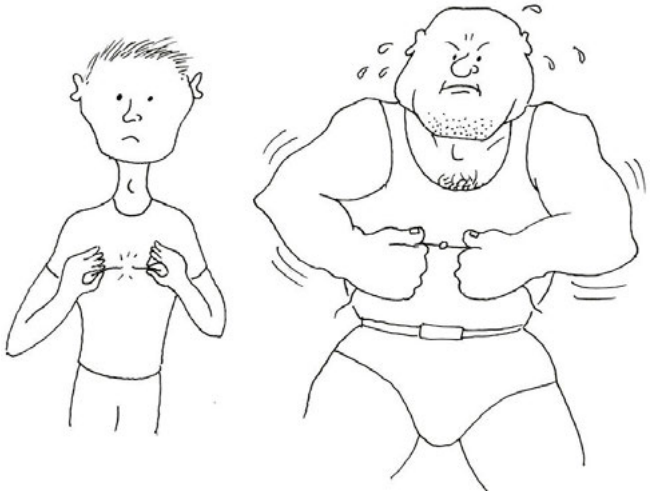


Figure 12-31. *Il n'est pas difficile de faire la différence entre une mauvaise soudure (à gauche), et une soudure correcte (à droite).*

Les trois mythes de la soudure

Mythe 1 : Le soudage est très difficile. Des millions de gens ont appris à souder et ils ne peuvent pas tous être plus compétents que vous.

Mythe 2 : La soudure est dangereuse pour votre santé, à cause de produits chimiques nocifs. Vous devez éviter d'inhaler la fumée produite, mais cela s'applique à de nombreux produits du quotidien tels que la lessive ou la peinture. Si vous préférez éviter le contact avec la soudure, vous pouvez porter des gants de vinyle.

Mythe 3 : Les fers à souder sont dangereux. Vous devez évidemment agir avec précaution. Un fer à souder est bien entendu assez chaud pour provoquer une brûlure de votre peau si vous le touchez, et vous ne devez jamais le faire tomber. Selon mon expérience, les outils électroportatifs sont beaucoup plus dangereux.

Huit erreurs à éviter

Pas assez de chaleur. Le point de soudure paraît être correct, mais la chaleur appliquée ayant été trop faible, le métal d'apport n'a pas fondu suffisamment pour structurer ses molécules autour des fils. Il est granuleux au lieu de former une boule uniformément solide, et vous réalisez une *soudure sèche*, parfois baptisée *soudure froide*, qui se rompra si vous tirez les fils pour les séparer. Chauffez à nouveau le point de soudure et appliquez à nouveau un peu de métal d'apport.

Faire couler le métal d'apport sur la jonction. La tentation de faire couler le métal d'apport sur la panne du fer à souder, puis de le déposer sur le point de jonction est une des causes majeures des soudures sous chauffées. Il en résulte que les fils seront froids lorsque vous essayerez de leur appliquer le métal d'apport, et qu'ils pourront s'en séparer et ne pas y adhérer correctement. Vous devrez alors commencer par mettre en contact la panne du fer avec les fils, puis appliquer la soudure lorsqu'ils seront suffisamment chauffés pour la faire fondre.

> *Je ne le répèterai jamais assez, c'est un problème bien connu, ne mettez jamais de métal d'apport en fusion sur des fils froids. Toujours appliquer le métal d'apport froid sur des fils chauds.*

Trop de chaleur. Ce n'est pas un risque important avec un fer à souder de 15 W, mais cela peut tout de même se produire. Prolonger l'échauffement vous aidera à réaliser une soudure de bonne qualité, mais cela pourrait endommager tout ce qui l'entoure. La gaine isolante des fils fondra, vous risquerez également de détruire les composants semi-conducteurs. Les composants endommagés doivent être dessoudés et remplacés ce qui prend du temps et s'avère être parfois un casse-tête. Si vous ne parvenez pas à faire

une soudure, quelle qu'en soit la raison, faites une pause, laissez tout se refroidir un peu avant de recommencer.

Pas assez de métal d'apport. Une petite connexion entre deux conducteurs peut ne pas être suffisamment robuste. Après avoir réalisé la soudure de deux fils, vérifiez la partie inférieure du point de soudure pour vérifier si le métal d'apport a pénétré totalement. C'est une situation où l'utilisation d'une loupe vous aidera.

Bouger un fil avant que la soudure ne soit solidifiée. Cela peut créer une fissure que vous ne verrez pas toujours. Cela pourrait ne pas empêcher le fonctionnement de votre circuit, mais dans le futur, la fissure pourrait se rompre et interrompre le contact électrique. Si vous maintenez les composants en place avant de les souder, ou si vous utilisez des plaques perforées pour les maintenir en place, vous éviterez ce problème.

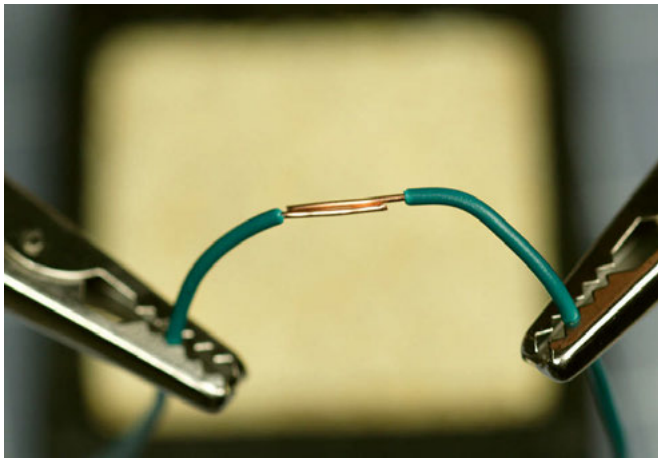


Figure 12-32. *Étape 1 : alignez les fils.*

Présence de graisse ou de saleté. Le métal d'apport pour l'électronique contient du flux qui aide au nettoyage du métal que vous soudez, toutefois, une couche de saleté peut empêcher la soudure de s'accrocher. Si un composant paraît sale, nettoyez-le avec du papier de verre très fin avant de le souder.

Oxydation de la panne du fer à souder. La panne accumule progressivement des traces de carbonisation qui peuvent se comporter comme une barrière isolante à la chaleur. Nettoyez la panne comme indiqué précédemment.

Matériaux incompatibles. Le métal de soudure électronique est prévu pour souder des composants électroniques. Il ne permettra pas de souder l'aluminium, l'acier inoxydable et certains autres métaux. Vous arriverez à souder des pièces chromées, mais avec beaucoup de difficulté.

Oubli de vérifier le point de soudure. Ne vous contentez pas de penser que votre soudure est correcte. Vérifiez toujours sa solidité en appliquant une force mécanique. Si vous ne parvenez pas à accéder au point de soudure, utilisez un tournevis sous la soudure pour la soulever, et utilisez une pince plate pour tirer. Ne regrettez pas de détruire votre travail. Si la soudure ne résiste pas, c'est qu'elle était de mauvaise qualité.

Parmi ces huit erreurs, les soudures sèches sont les plus fréquentes et les plus ennuyeuses car elles sont faciles à faire mais paraissent correctes.

Votre seconde soudure

Il est temps, maintenant, de faire une soudure plus délicate. Votre fer à souder doit à nouveau avoir été branché depuis au moins cinq minutes, afin d'être sûr qu'il est assez chaud pour réaliser de bonnes soudures.

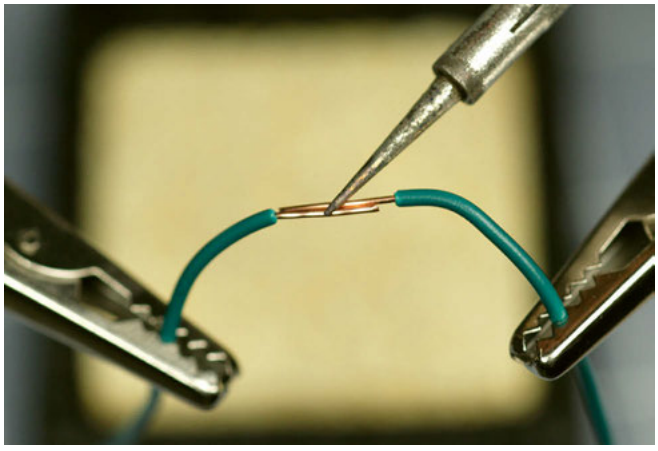


Figure 12-33. *Étape 2 : chauffez les fils.*

Cette fois, j'aimerais que vous aligniez les fils parallèlement l'un à l'autre. Les souder de cette façon est un peu plus difficile que de les relier quand ils se croisent, mais il est nécessaire de savoir le faire. Sinon, vous ne pourrez pas

glisser un morceau de gaine thermorétractable sur une liaison soudée, pour l'isoler.

Les cinq étapes pour réaliser cette soudure sont illustrées sur les figures 12-32 à 12-36. Au début, les fils n'ont pas à être en contact parfait, le métal d'apport remplira les petits espaces. Comme précédemment, les fils doivent être suffisamment chauffés pour que le métal d'apport fonde, cela prendra quelques secondes de plus si vous utilisez un fer de faible puissance.

Faites attention à appliquer le métal d'apport comme indiqué sur les figures. Rappelez-vous, ne faites pas couler le métal d'apport sur la jonction à partir de la panne du fer. Commencez par chauffer les fils, puis mettez le métal d'apport en contact avec les fils. Attendez qu'il se liquéfie, vous verrez alors le métal d'apport couler rapidement sur les fils. Si ce n'est pas le cas, chauffez les fils un peu plus longtemps.

La jonction terminée doit avoir assez de métal d'apport pour sa solidité, mais pas trop, ce qui pourrait empêcher la gaine thermorétractable de glisser sur le point de soudure. Je vais aborder ce sujet dans un instant.

Fondamentaux : théorie de la chaleur

Lorsque vous faites une soudure, votre objectif est de transférer de la chaleur de votre fer à souder vers la jonction que vous voulez réaliser. Pour cette raison, faites en sorte d'ajuster l'angle de votre fer à souder, de façon à réaliser un contact le plus grand possible avec les éléments à souder. Ceci est particulièrement important quand vous soudez des fils de diamètre important.

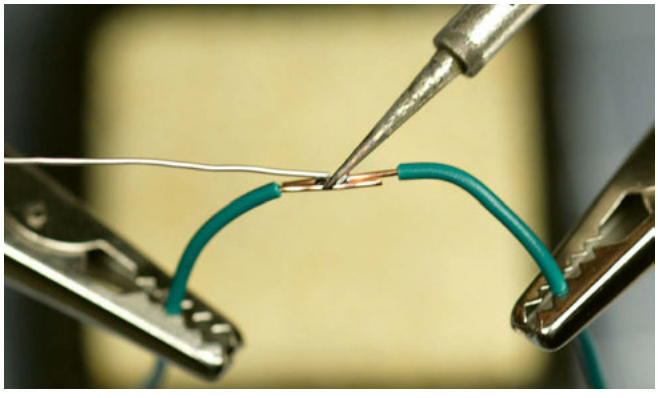


Figure 12-34. *Étape 3 : appliquez le métal d'apport.*

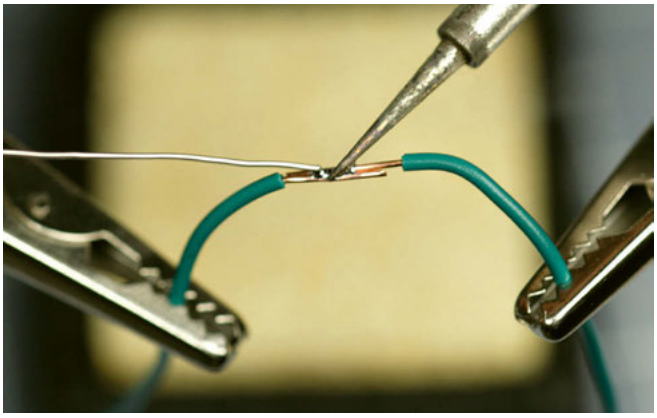


Figure 12-35. *Étape 4 : le métal d'apport commence à fondre à la jonction.*

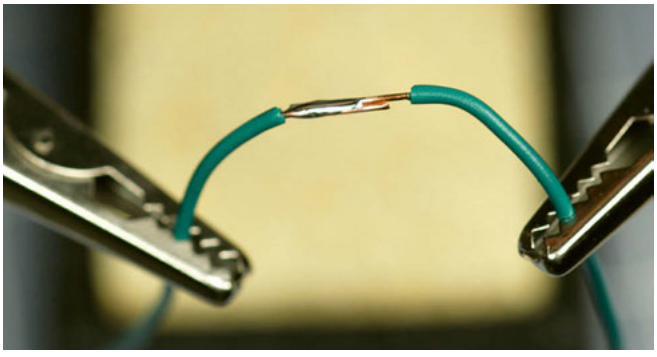


Figure 12-36. *Étape 5 : la jonction terminée est brillante et le métal d'apport s'est réparti sur la surface des fils.*

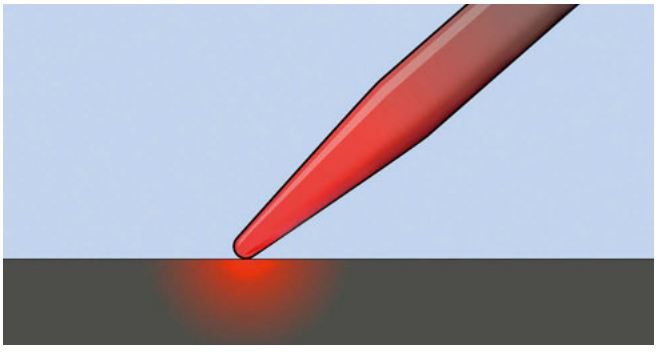


Figure 12-37. *Un contact réduit entre le fer et la surface de travail ne permet pas un transfert de chaleur suffisant.*

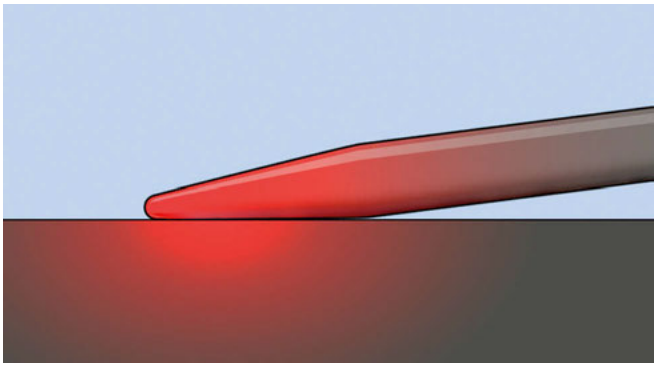


Figure 12-38. *Une surface de contact plus importante accroît le transfert de chaleur.*

Quand le métal d'apport commence à fondre, il augmente la surface de contact, ce qui permet de transférer encore plus de chaleur, ainsi le processus accélère naturellement. Son initialisation est la partie astucieuse.

L'évacuation de chaleur vers des endroits que l'on ne souhaite pas, au détriment de l'endroit que vous souhaitez chauffer, est un autre aspect du transfert de chaleur que vous devriez prendre en considération. Si vous réalisez la soudure d'un fil de cuivre de gros diamètre, la jonction pourrait ne jamais devenir suffisamment chaude pour faire fondre la soudure, car le fil va conduire la chaleur vers l'extérieur du point de jonction. Il se pourrait même qu'un fer à souder de 40 W ne soit pas assez puissant pour éliminer ce problème. Alors que le cuivre du fil n'est pas assez chaud pour liquéfier le métal d'apport, cette chaleur pourrait cependant faire fondre sa gaine isolante.

En règle générale, si vous ne parvenez pas à terminer une soudure en 15 secondes, c'est que vous ne chauffez pas assez.

Gaine thermorétractable

Si vous avez de la gaine thermorétractable et un pistolet à air chaud, il vous sera facile d'isoler la jonction soudée que vous venez de réaliser entre deux fils maintenus en parallèle.

Coupez une longueur d'environ 25 mm d'une gaine dont le diamètre permet de la faire glisser sur le point de soudure, et centrez-la sur la jonction selon la figure 12-39.

Maintenez la jonction face à votre pistolet à air chaud et mettez celui-ci en marche. (Éloignez vos doigts du jet d'air chaud.)

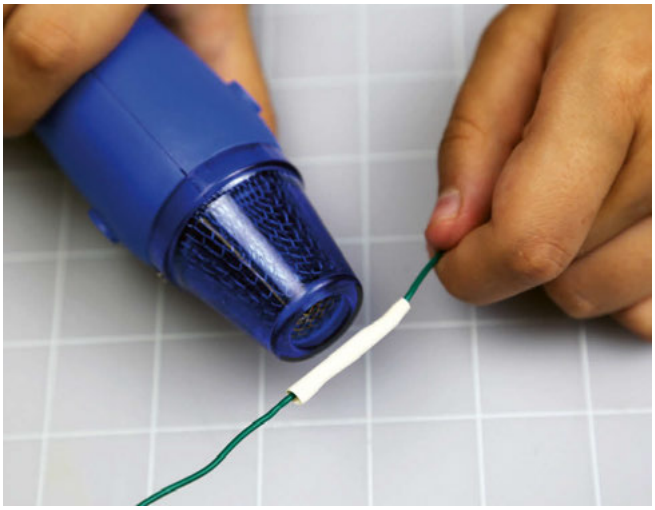


Figure 12-39. *Préparation de l'isolation de votre soudure.*

Figure 12-40. *La gaine s'est rétractée, l'opération est terminée.*

Tournez les fils afin de chauffer les deux côtés. La gaine devrait se rétracter approximativement en 15 secondes. Voir la figure 12-40.

Si vous surchauffez la gaine, elle risque de trop se rétracter et se rompre, vous devrez alors la retirer en la découpant avec un cutter et recommencer. Dès que la gaine s'est resserrée, il n'y a aucune raison de continuer à la chauffer. Notez que la gaine thermorétractable se rétracte principalement selon son diamètre, un léger rétrécissement en longueur est néanmoins possible.

Figure 12-41. *Vos proches doivent comprendre qu'il ne faut pas prendre un pistolet à air chaud pour un sèche-cheveux.*

J'ai utilisé de la gaine blanche car elle ressort bien sur les photos. Les autres couleurs de gaine thermorétractable ont un comportement identique.

Attention : les pistolets à air chaud deviennent chauds !

Si vous utilisez un pistolet à air chaud muni d'une buse métallique, il restera assez chaud pour vous brûler pendant plusieurs minutes après son utilisation. Comme en ce qui concerne les fers à souder, vos proches (et les animaux de compagnie) sont vulnérables, car ils ne savent pas nécessairement qu'un pistolet à air chaud est dangereux. Assurez-vous que personne dans votre entourage n'utilise un pistolet à air chaud comme sèche-cheveux (voir la figure 12-41). Prévenez-les avant de vous en servir.

Câblage de votre bloc d'alimentation

Si vous avez acquis un adaptateur secteur, comment le relier à votre plaque de montage ? Vous pouvez le faire de la façon la plus simple ne demandant pas de soudage, ou mieux, en utilisant les compétences en soudage que j'ai décrites précédemment.

Je vais détailler les deux méthodes, mais dans chaque cas, vous devrez commencer par supprimer le connecteur du câble de sortie du bloc secteur, en coupant son câble, comme le montre la figure 12-42. Inutile de vous préciser de *ne pas le faire* si l'adaptateur est branché à une prise murale.

Déterminons maintenant lequel des deux conducteurs du câble est la sortie positive du bloc, l'autre étant la sortie négative. L'un d'eux devrait porter un repère, comme le montre la figure 12-43, il s'agit probablement du fil positif, mais « probablement » n'est pas un mot que j'apprécie. Soyons-en certains.

Figure 12-42. *La coupure du câble de l'adaptateur secteur ne doit être faite que s'il n'est pas relié à une prise murale.*

Figure 12-43. *Un des conducteurs de votre bloc secteur devrait comporter un marquage, indiquant habituellement le fil positif, mais vous devez vous en assurer.*

Séparez les deux conducteurs à l'aide d'un cutter selon la figure 12-44. Après les avoir séparés, dénudez-les sur environ 12 mm, comme le montre la figure 12-45.

Faites attention à maintenir les fils séparés. Il *ne faut pas* qu'ils se touchent dans les étapes suivantes, car vous devez brancher l'adaptateur, même si les fils véhiculent une faible tension, s'ils se touchent, il se produira une étincelle qui ne plaira à personne.

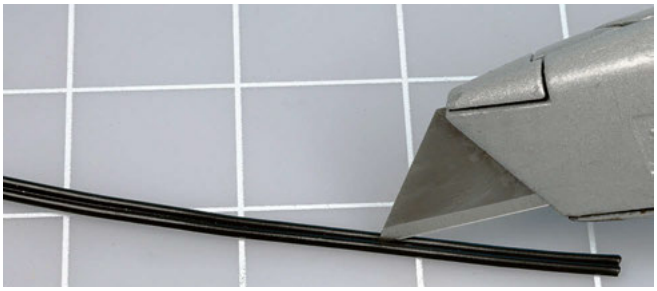


Figure 12-44. *Séparez les deux conducteurs à l'aide d'un cutter.*

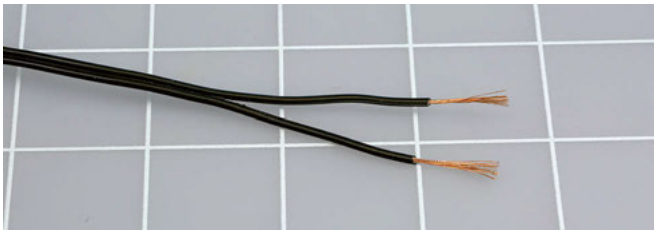


Figure 12-45. *Éloignez les conducteurs l'un de l'autre.*

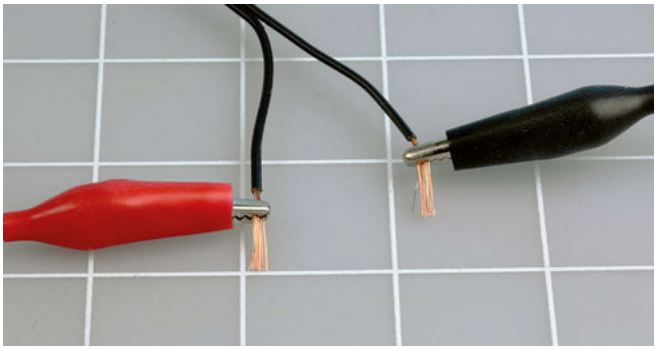


Figure 12-46. *Séparez les conducteurs en les tenant éloignés, avant de brancher votre adaptateur.*

Il serait prudent de maintenir les fils éloignés à l'aide de pinces crocodiles, voir la figure 12-46.

Branchez maintenant votre adaptateur, réglez votre multimètre pour la mesure des tensions continues et mesurez la tension délivrée par l'adaptateur. Vous allez simplement déterminer quel est le fil positif, et quel est le fil négatif. Si un signe moins apparaît sur le multimètre, inversez les pointes de touche du multimètre et refaites la mesure.

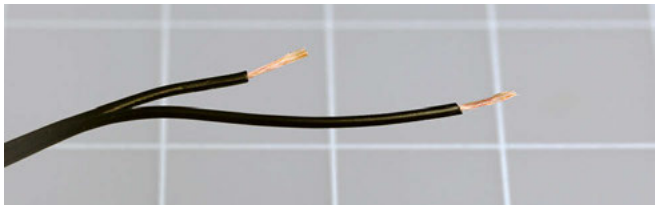


Figure 12-47. *Par précaution, vous pouvez couper les fils de l'adaptateur à des longueurs différentes.*

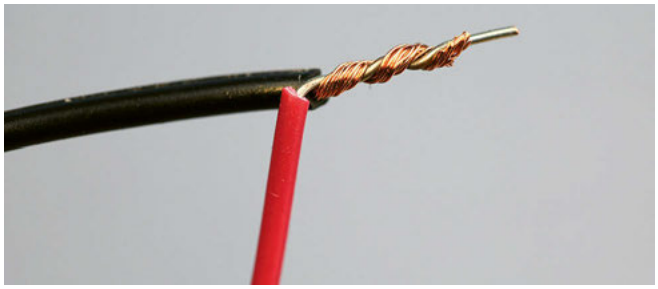


Figure 12-48. *Les conducteurs sont torsadés pour former une épissure.*

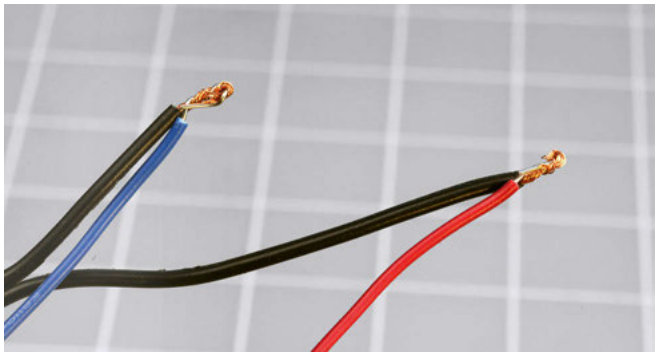


Figure 12-49. *Repliez les extrémités torsadées.*

Lorsque la lecture de votre multimètre est positive, vous savez que le fil rouge du cordon de mesure de votre multimètre est relié au fil positif de l'adaptateur. C'est un point important, car il faut éviter de détruire les composants de vos circuits en inversant la polarité de leur tension d'alimentation.

Débranchez maintenant l'adaptateur et repérez le fil *positif* par un marquage spécifique. Vous pouvez utiliser un morceau de ruban adhésif ou une pince crocodile. Rappelez-vous que le fil positif est celui que vous avez identifié avec le fil rouge du cordon de mesure, et que vous devez repérer.

Dans le paragraphe précédent, je vous suggérais de débrancher le bloc secteur. L'avez-vous fait ? Merci de vérifier pour en être certain avant de continuer.

Vous allez maintenant couper un fil plus court que l'autre, afin de minimiser les risques qu'ils se touchent si une des soudures que vous allez faire, venait à se rompre dans le futur. Le fil négatif sera le plus court. Utilisez votre pince coupante pour le raccourcir, puis dénudez-le sur 12 mm. Le résultat devrait être semblable à celui de la figure 12-47.

Prenez maintenant 8 cm de fil de câblage rouge et 8 cm de fil bleu ou noir que vous allez relier aux fils de l'adaptateur, soit en les soudant, soit en utilisant des connecteurs rapides à écrous. (Vous avez bien débranché votre adaptateur n'est-ce pas ?)

Si vous n'avez pas de fer à souder :

Torsadez les fils comme sur la figure 12-48, puis repliez leurs extrémités torsadées afin de doubler leur épaisseur, comme sur la figure 12-49, pour qu'ils s'insèrent fermement dans les connecteurs à écrous. Vissez les écrous, comme sur la figure 12-50. Assurez-vous qu'il soit fermement serré. Ajoutez un morceau de ruban adhésif pour maintenir chaque écrou. J'ai choisi la couleur bleue pour la connexion négative.

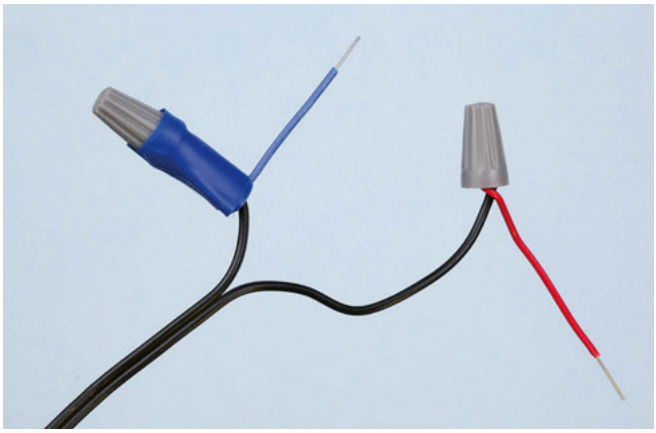


Figure 12-50. *Connecteur à écrou maintenu par du ruban adhésif.*

Si vous avez un fer à souder :

Reliez chaque fil de l'adaptateur au fil de câblage de la couleur adaptée, comme je l'ai décrit dans la procédure de soudure de fils parallèles. Si vous avez un doute quant à la qualité d'une de vos soudures, chauffez-la à nouveau, séparez les fils et recommencez. Il faut éviter que vos jonctions soudées puissent se rompre par la suite.

Vous devez maintenant isoler vos soudures. Utilisez, de préférence, de la gaine thermorétractable. Si vous n'en avez pas, vous pouvez insérer des connecteurs rapides à écrous au niveau du point de soudure et les serrer fermement. Sinon, utilisez du ruban adhésif pour électricien, et si vous n'avez pas ce type de ruban adhésif, utilisez du scotch normal en deux ou trois épaisseurs. Quoi qu'il en soit, vous devez isoler vos soudures !

Les fils de câblage ainsi préparés peuvent maintenant être insérés dans votre plaque de montage, vous voilà libéré de l'obligation d'utiliser des piles de 9 V.

Expérience 13
Faites surchauffer une LED

Dans l'expérience 13, je vous ai montré comment griller une LED. Ce qui s'est passé durant cette petite péripétie était dû à un courant trop élevé traversant la LED, ayant pour conséquence sa surchauffe, et la chaleur excessive endommagea la composant.

Si la chaleur engendrée par un courant électrique peut détruire une LED, pensez-vous que la chaleur délivrée par votre fer à souder peut en faire autant ? Cela semble vraisemblable, il n'y a qu'un seul moyen d'en être absolument certain.

Ce dont vous aurez besoin :

- 1 source d'alimentation 9 V CC (pile ou adapteur secteur)
- 1 pince plate à bec fin ou une pince plate à bec allongé
- 1 fer à souder de puissance 15 W
- en option, un fer à souder de 30 W
- 1 LED de 3 mm
- 1 résistance de 470 ohms
- 1 « troisième main » pour maintenir votre travail
- 1 pince crocodile en cuivre pur

Je vous recommande une LED de 3 mm pour cet essai, car elle est plus susceptible d'être endommagée par surchauffe qu'une LED de 5 mm. J'ai choisi une LED jaune, plus facile à photographier qu'une rouge. Vous pouvez utiliser une LED de couleur quelconque, dont vous disposez.

Votre objectif est d'étudier les effets de la chaleur, et pour cela, vous devez connaître où la chaleur est transmise. Ayant cela en tête, on ne va pas utiliser une plaque de montage dont les contacts internes absorberaient une partie indéterminée de la chaleur. Je ne veux pas non plus que vous utilisiez des fils de tests car ils absorberaient également la chaleur.

Utilisez votre pince à bec long pour replier un fil de la LED en forme de crochet, et faites de même avec un des fils de la résistance de 470 ohms.

La figure 13-1 montre la préparation. Afin de minimiser la perte de chaleur par conduction, laissez la résistance pendre au fil négatif de la LED, et le fil d'alimentation positif directement relié à l'autre fil de la LED. La gravité devrait suffire à maintenir l'ensemble en place.

Le corps en plastique est maintenu par une pince crocodile de votre « troisième main ». Le plastique n'étant pas très bon conducteur de la chaleur, la lentille de la LED ne devrait pas perdre trop de chaleur par conduction.

Appliquez la tension de 9 V, la LED devrait briller intensément. Attendez que votre fer à souder de 15 W soit complètement chaud, puis mettez en contact la panne du fer avec l'un des fils de la LED allumée.

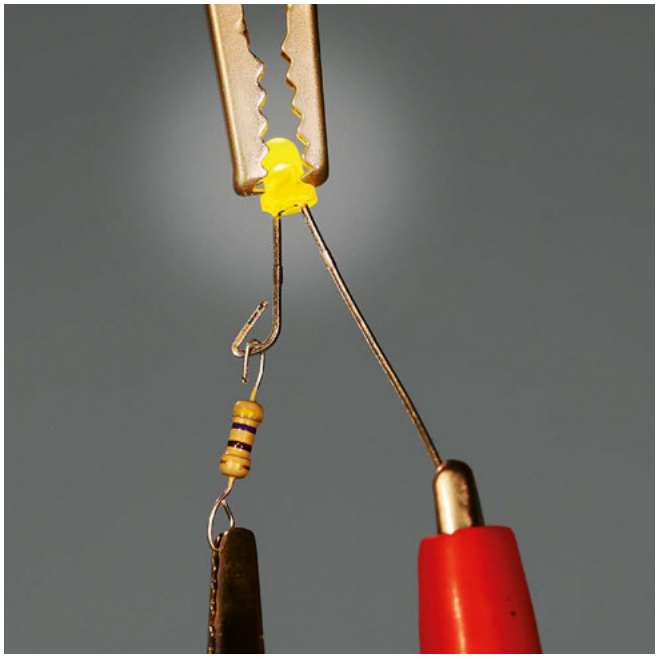


Figure 13-1. *Prêt à déterminer la résistance à la chaleur d'une LED jaune de 3 mm.*

Après environ 15 secondes, vous devriez voir la LED commencer à souffrir. Quinze secondes plus tard, elle faiblira en rougeoyant comme sur la figure 13-2.

Votre LED a été sacrifiée au profit de votre connaissance. C'est une mort honorable. Laissez-la reposer dans votre poubelle, et remplacez-la par une LED neuve que nous allons essayer de traiter plus doucement. Connectez-la comme précédemment, mais ajoutez cette fois une pince crocodile en cuivre entre la panne de votre fer à souder et le boîtier de la LED. Vous devriez pouvoir maintenir votre fer à souder ainsi pendant 2 minutes sans griller la LED.

Où est passée la chaleur ?

Imaginez la chaleur sortant de votre fer à souder. Elle s'écoule dans le fil de la LED, mais rencontre la pince crocodile sur son chemin, comme illustré sur la figure 13-3. La chaleur préfère s'écouler dans la pince crocodile en cuivre, ce qui préserve la LED, car le cuivre conduit la chaleur bien mieux que la capsule en plastique de la LED.

Ainsi, on peut considérer que la pince crocodile s'est comportée comme un *refroidisseur*.

Une pince crocodile en cuivre donnera un meilleur résultat qu'une pince crocodile usuelle en acier nickelé car le cuivre est un bien meilleur conducteur de la chaleur.

Griller un composant est ennuyeux (surtout si vous n'avez pas de pièce de remplacement). Soyez prudent, utilisez un moyen de refroidissement si vous devez utiliser un fer à souder de 15 W très près d'un semi-conducteur pendant 20 secondes ou plus.

Si vous utilisez un fer à souder de 30 W, l'utilisation d'un refroidisseur est impérative.

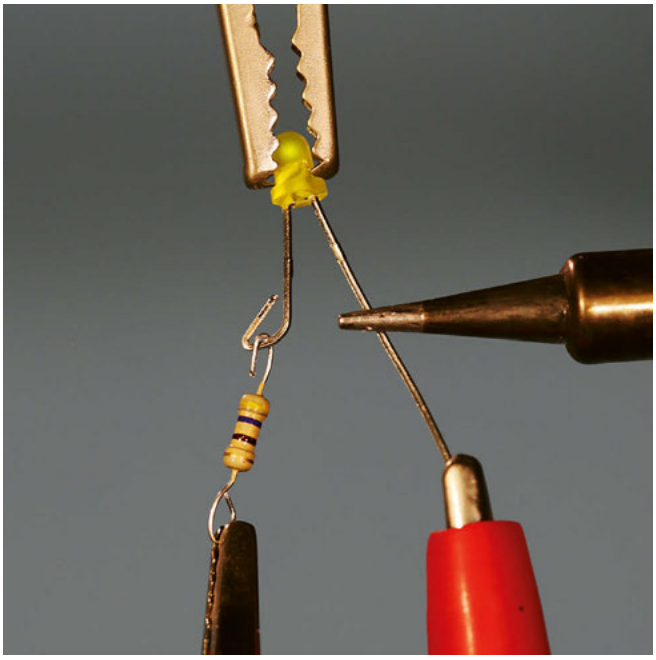


Figure 13-2. *Après application de chaleur pendant 15 secondes à l'aide d'un fer à souder de 15 W.*

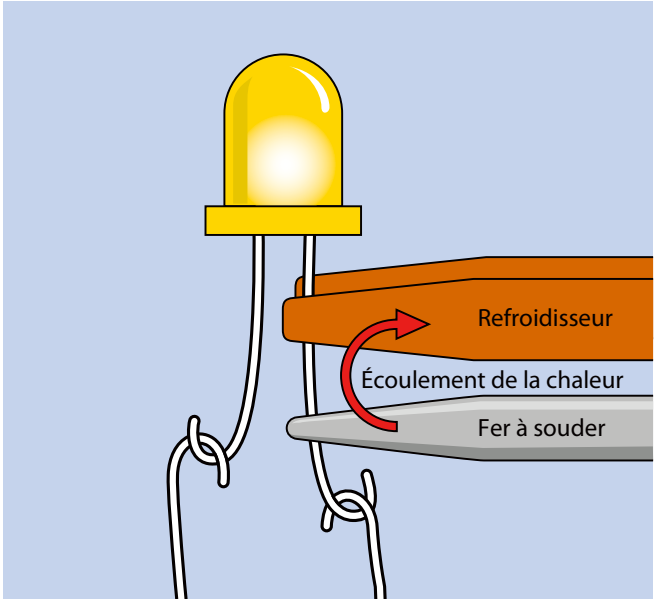


Figure 13-3. *Évacuation de la chaleur en dehors d'une LED par une pince crocodile en cuivre.*

Expérience 14
Multivibrateur portable

En réalisant un circuit sur une plaque perforée, il peut avantageusement être de dimensions réduites. Il peut même devenir portable sur un vêtement, si vous trouvez un endroit où loger la pile Si vous installez le circuit devant une casquette, vous pouvez dissimuler la pile entre le sommet de la casquette et votre tête. Dans ce petit projet, le circuit du multivibrateur astable de l'expérience 10 est réduit pour tenir sur une plaque perforée de 15 mm par 25 mm.

Ce dont vous aurez besoin :

- 1 source d'alimentation 9 V CC (pile ou adapteur secteur)
- du fil de câblage, 1 pince coupante, 1 pince à dénuder, 1 multimètre
- 1 fer à souder de 15 W
- du fil de soudure de diamètre 1,5 mm ou plus fine
- une plaque perforée vierge (sans placage de cuivre) au pas de 2,54 mm
- 1 « troisième main » ou un moyen similaire
- résistances : 4,7K (2), 470K (2)
- 2 condensateurs en céramique de 1 µF
- 2 transistors 2N3904
- 2 LED rouge de 3 mm de diamètre

Adaptation du circuit à la plaque perforée

La façon la plus simple d'installer les composants sur une plaque perforée, est de réaliser des connexions point-à-point. Cela se fait comme cela :

1. Dessiner un plan du placement des composants en prévoyant de relier leurs fils entre eux.

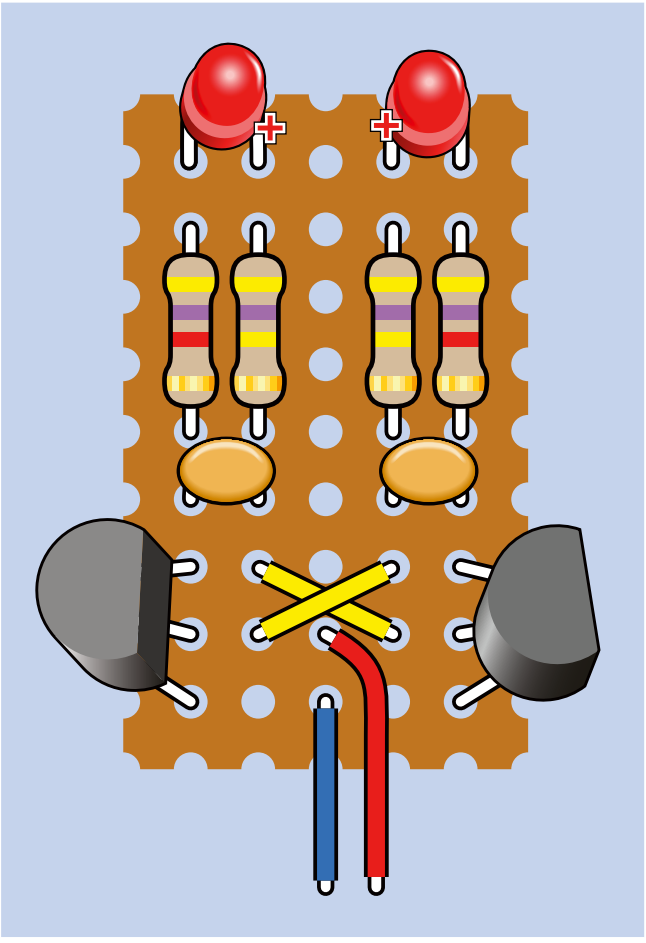


Figure 14-1. *Plan de câblage point-à-point du multivibrateur astable sur une plaque perforée.*

2. Insérez les fils dans les perforations de la plaque.

3. Pliez les fils de façon à les relier entre eux sous la plaque.

4. Faire les soudures.

5. Couper la longueur excédentaire des fils.

Tout cela paraît bien simple, mais il y a quelques points à considérer.

1. Les fils sous la plaque ne seront pas isolés, il faut donc éviter les croisements. Des fils de pontage peuvent être ajoutés sur la face supérieure de la plaque si des croisements sont inévitables.

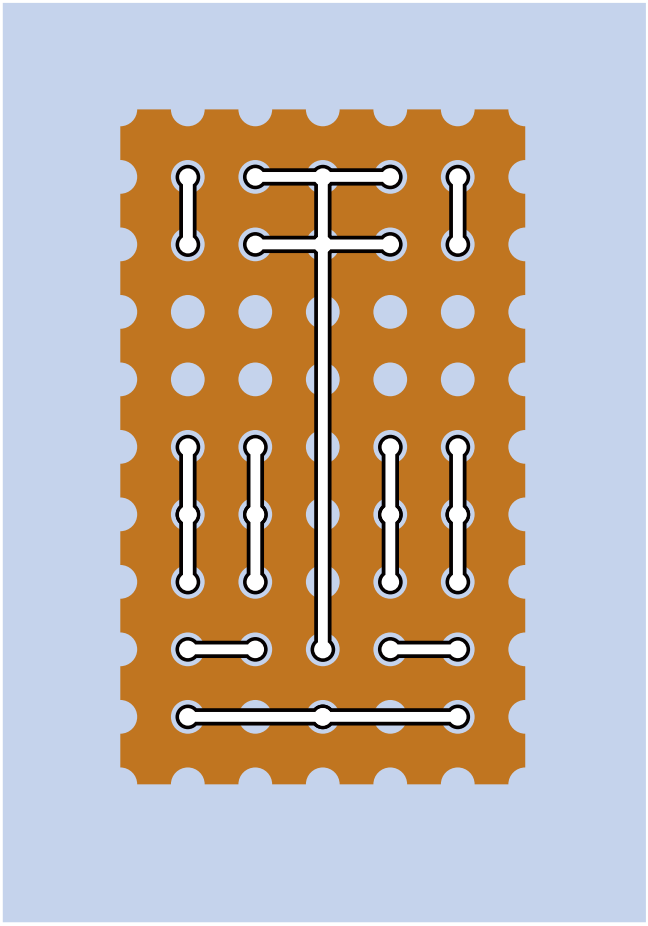


Figure 14-2. *Liaisons sous les composants de la figure 14-1*

2. Si vous souhaitez obtenir un circuit particulièrement compact, il vous faudra travailler à une échelle miniature, et vous aurez quelques difficultés à réaliser les soudures si votre fer à souder possède une panne relativement large.

Le circuit du multivibrateur astable de la figure 11-2 est parfait pour une réalisation sur une plaque perforée, car les positions de ses composants n'ont pas à être modifiées pour s'adapter à la plaque perforée. La figure 14-4 montre le plan de ma réalisation. Rappelez-vous que les perforations de la plaque sont espacées de 2,54 mm.

Tous les fils qui traversent la plaque doivent être reliés sous la plaque selon la figure 14-2. C'est un circuit particulièrement facile à visualiser car il est symétrique.

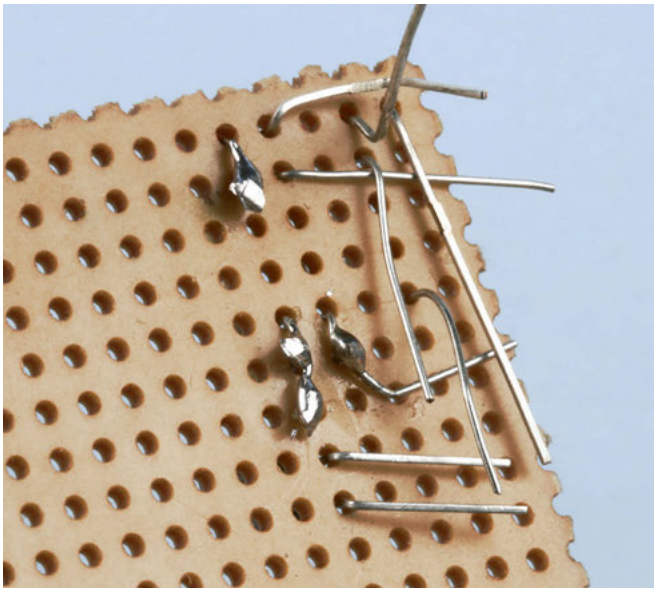


Figure 14-3. *Soudage des fils sous la plaque perforée.*

La plupart des circuits sont asymétriques, il vous sera plus difficile de les imaginer quand votre plaque sera retournée. C'est une raison supplémentaire pour commencer par dessiner un plan précis avant de commencer et d'en faire une image miroir avec un logiciel de dessin, ainsi vous verrez comment il doit se présenter de l'autre côté de la plaque perforée.

Comparez les figures 14-1 et 14-2, vous devriez pouvoir suivre les connexions et vérifier qu'elles correspondent exactement au schéma de la figure 11-2.

Passons à la partie la plus délicate : sa réalisation.

Procédure

La figure 14-3 montre la réalisation en cours. Remarquez que je réalise le circuit dans le coin d'une plaque plus large, ainsi, les pinces crocodiles de ma « troisième main » peuvent la maintenir correctement. Je ne découperai pas la plaque avant que le circuit ne soit entièrement terminé et testé.

Ma procédure consiste à insérer les fils de quatre ou cinq composants dans les trous de la plaque, de plier leurs extrémités, afin d'éviter que les composants ne puissent

retomber quand la plaque sera retournée. Ensuite, en me référant à mes plans de câblage (comme sur la figure 14-2), j'en soude quelques-uns, je coupe leurs longueurs excessives, puis j'insère d'autres fils. Je m'arrête souvent pour vérifier mes soudures à la loupe, car il est très facile de commettre une erreur.

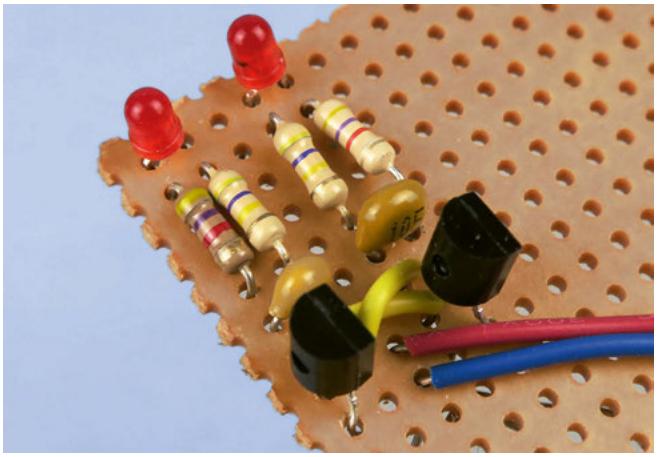


Figure 14-4. *L'ensemble des composants a été installé.*

La figure 14-4 montre la face supérieure de la plaque avec l'ensemble des composants présents, la figure 14-5 montre le dessous de la plaque après avoir coupé les fils à leur longueur finale. Ce n'est pas une vue très jolie, mais je n'ai jamais voulu réaliser un travail minutieux, j'espère qu'en vous montrant mon résultat, vous aurez l'impression de pouvoir faire mieux.

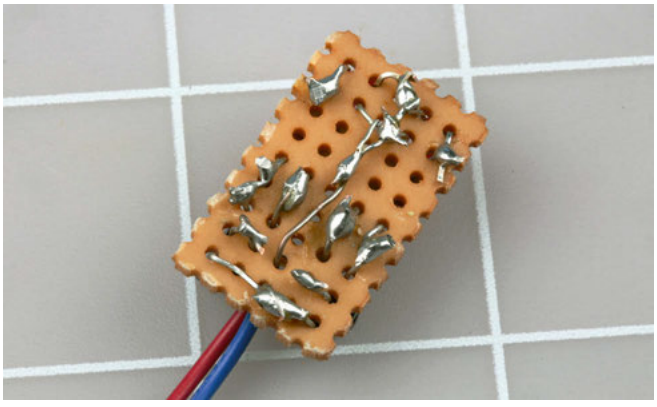


Figure 14-5. *Les soudures ont été terminées et la plaque découpée.*

La réalisation terminée est représentée sur la figure 14-6. Je dispose d'une scie à ruban qui est l'idéal pour découper une plaque perforée, mais une scie à métaux est presque aussi facile à utiliser. Vous devrez tester le fonctionnement du circuit avant de découper la plaque qu'il faudra maintenir dans un étau, par une partie inutilisée, et non par la partie sur laquelle sont installés les composants.

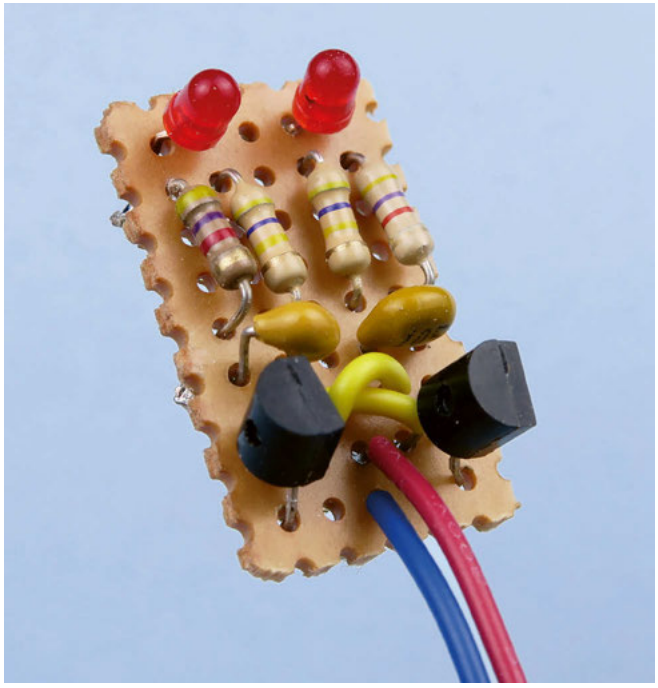


Figure 14-6. *Circuit du multivibrateur astable réalisé sur la plaque perforée.*

Alternatives plus simples

Vous trouvez qu'il est peut-être trop difficile de relier les fils. Y a-t-il une autre possibilité plus simple ?

Oui, vous pouvez vous procurer une plaque perforée comportant des pistes de cuivre selon différentes configurations, comme par exemple la plaque perforée de la figure 12-17, imitant une plaque de montage. Vous devrez souder chaque fil dans son trou, et les pistes de cuivre réaliseront les liaisons avec les autres fils. Chaque fil ne nécessite qu'une seule soudure plutôt que deux ou trois fils partageant la même connexion. C'est plus facile à faire

et le résultat est plus présentable, mais comme je l'ai dit précédemment, ce ne sera pas aussi compact.

Une autre option consisterait à réaliser votre propre circuit imprimé, mais cela sort des objectifs de ce livre.

Correction des erreurs de câblage

J'ai eu de la chance quand j'ai réalisé le circuit du multivibrateur astable : je n'ai commis aucune erreur de câblage il a fonctionné du premier coup.

Comment supprimer une soudure quand vous avez commis une erreur ?

Nettoyez la panne de votre fer à souder et utilisez-la pour retirer autant de soudure que possible. Vous pouvez également utiliser une pompe à dessouder munie d'un embout caoutchouté comme celle de la figure 12-8, ou de la tresse à dessouder de la figure 12-9, mais j'ai déjà exprimé mon scepticisme au sujet de ces possibilités.

Vous devrez utiliser votre pince plate pour libérer un des fils pendant que vous faites fondre la soudure restante.

Les erreurs de câblage ne sont pas les seules causes de non-fonctionnement d'un circuit. J'ai déjà évoqué les problèmes dus à l'échauffement insuffisant, ou à la mauvaise qualité des soudures, mais un excès de soudure peut produire ses propres problèmes. Si un pont a été créé entre des fils qui ne doivent pas être reliés, utilisez un cutter pour faire deux coupures dans le point de soudure et retirez la partie ainsi découpée.

Toutes ces opérations seront facilitées si vous disposez d'un éclairage puissant.

Attention : projections de segments de fil

Les mâchoires de votre pince à dénuder exercent une force importante qui disparaît brusquement lorsque vous coupez un fil. Cette force peut provoquer un mouvement soudain du segment de fil coupé. Certains fils plus souples évitent ce risque, mais les fils des transistors et des LED sont plus rigides. Des petits segments peuvent être projetés à grande vitesse dans des directions imprévisibles, représentant un danger pour vos yeux lorsque vous faites un travail rapproché. Des lunettes de vue peuvent vous protéger lorsque vous raccourcissez des fils. Si vous ne portez pas de lunettes, porter des lunettes de sécurité en plastique serait une sage précaution.

Le casse-tête des unités

Je vais aborder maintenant un sujet que j'ai évité jusqu'à présent : les unités de mesures.

Bien que vous viviez probablement dans un pays ayant adopté le système métrique, vous rencontrerez parfois des éléments utilisés en électronique dont les dimensions sont exprimées en ***pouces***, représentés par des guillemets anglais (").

Les unités métriques et les pouces sont parfois utilisés simultanément dans la même documentation. Ainsi, lorsque je vous ai dit que les trous d'une plaque de montage étaient espacés de 2,54 mm, ils étaient en fait éloignés de 0,1 pouce. Les composants de circuits intégrés montés en surface (CMS) sont dimensionnés en millimètres, tandis que les circuits intégrés à fils traversants, plus anciens, sont dimensionnés en pouces. Leurs fils étant en général espacés de 0,1 pouce, ils ne seront probablement jamais dimensionnés en millimètres.

J'ai créé quatre tables de conversion qui vous permettront de passer d'un système à l'autre.

Le tableau de la figure 14-7 indique l'équivalence entre les fractions de pouce et les centièmes de pouce.

La figure 14-8 présente les équivalences entre les valeurs décimales et les fractions de pouce, car vous pourrez rencontrer par exemple une dimension de 0,375" qui est équivalente à 3/8", ce qui peut être utile à savoir.

De nombreuses fiches techniques utilisent des dimensions en millimètres et en pouces, mais les plus récentes utilisent uniquement les millimètres.

La figure 14-9 permet la conversion entre les millimètres, les centièmes de pouce, et les fractions de pouce. La figure 14-10 est une version à plus petite échelle de la table précédente et permet de convertir les dixièmes de millimètre en millièmes de pouce. Vous verrez ainsi que les broches d'un interrupteur à glissière sont espacées de 2,5 mm ce qui est légèrement inférieur à 0,1".

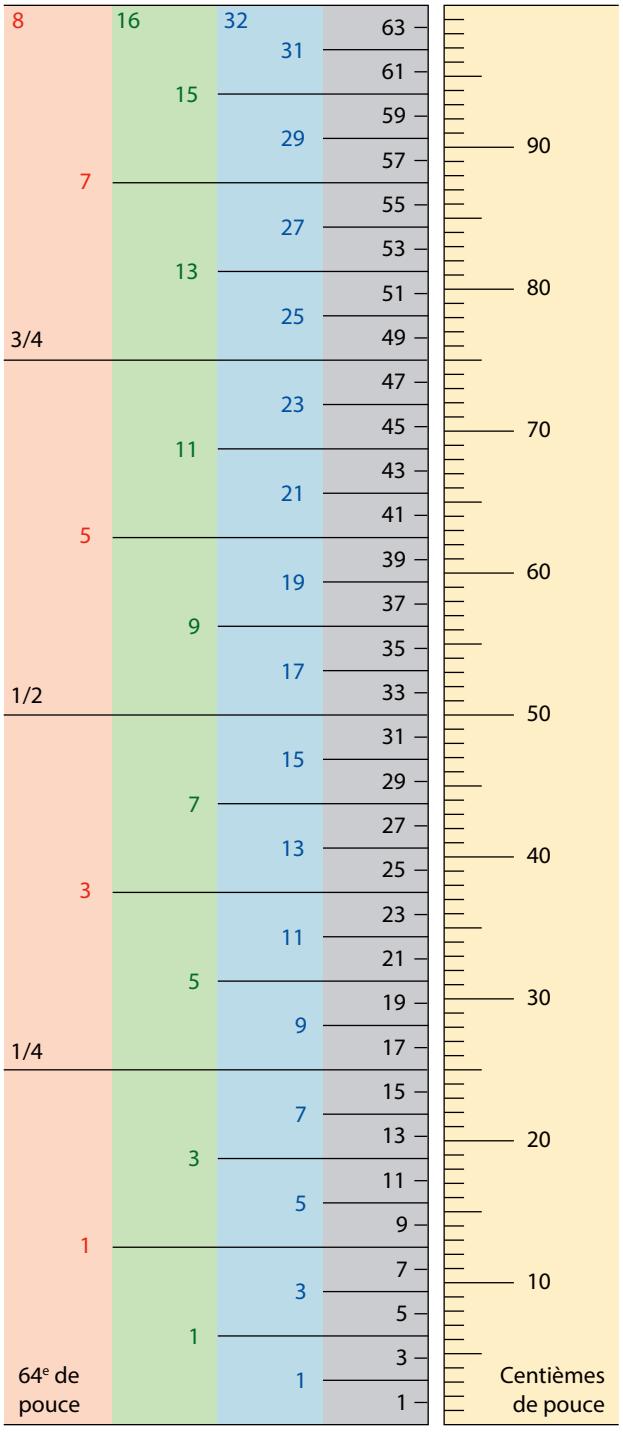


Figure 14-7. *Conversion entre fractions de pouce et centièmes de pouce.*

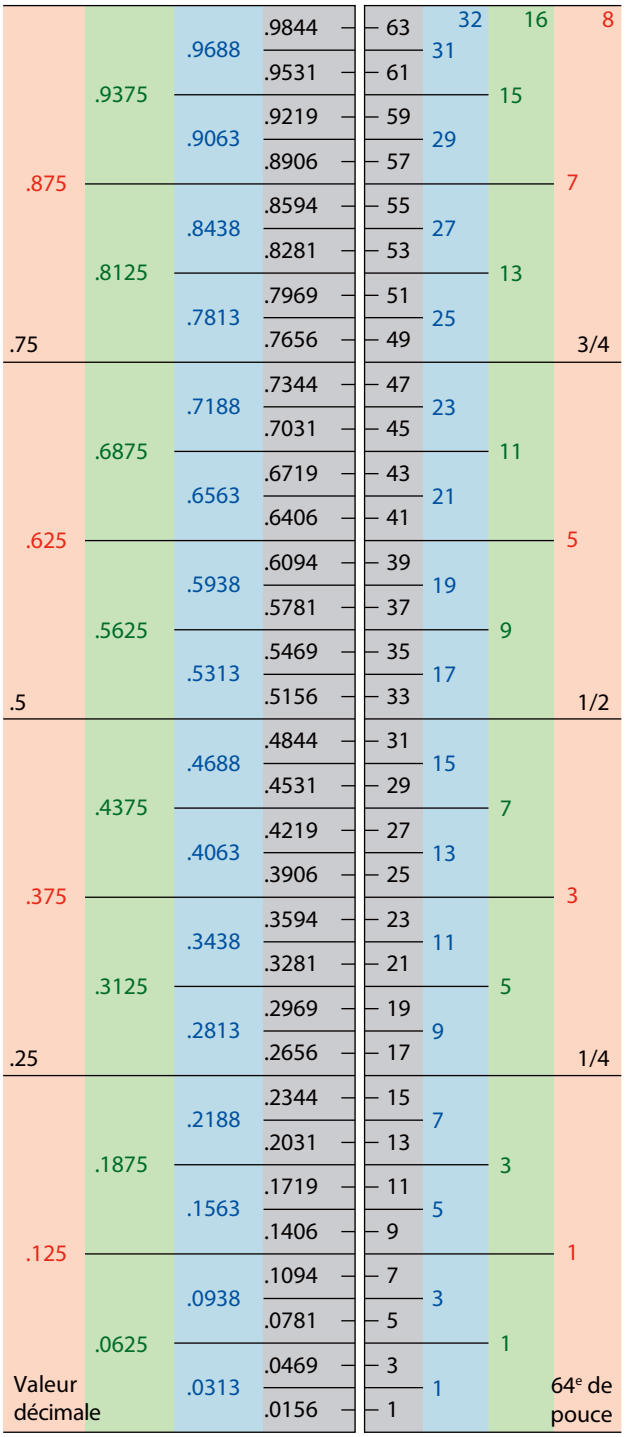


Figure 14-8. *Conversion entre valeurs décimales et fractions de pouce.*

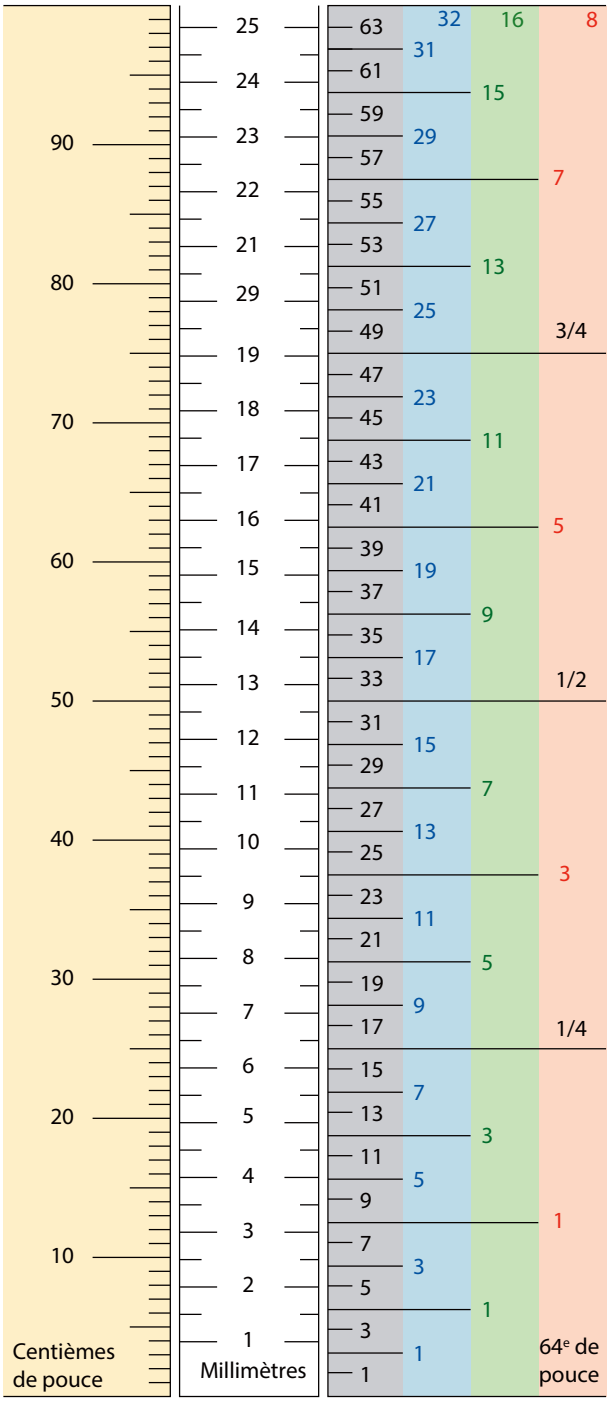


Figure 14-9. *Conversion entre centièmes de pouce, millimètres et fractions de pouce.*

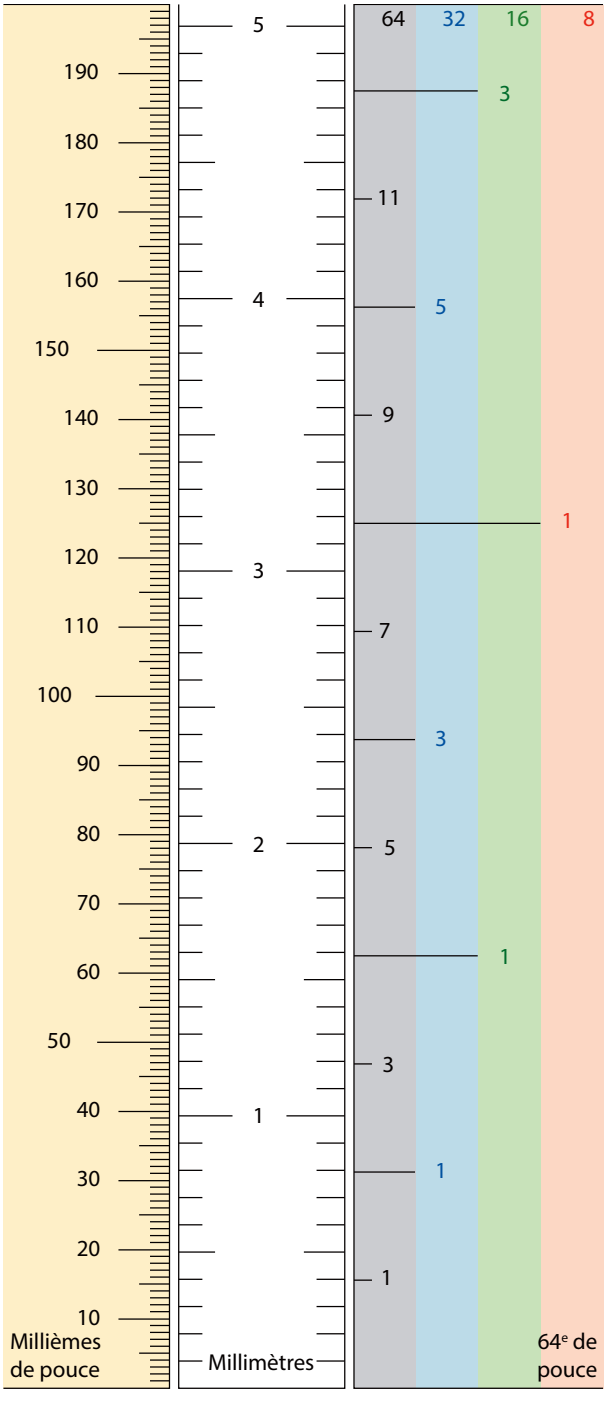


Figure 14-10. *Conversion des petites dimensions en millièmes de pouce, dixièmes de millimètres et fractions de pouce.*

Chapitre 4

Circuits intégrés

Avant d'aborder le sujet fascinant des circuits intégrés (appelés aussi *CI* ou *puces*, et en anglais *IC* ou *chips*), je dois vous dire que certaines choses que je vous ai fait faire dans les expériences précédentes, auraient pu être réalisées beaucoup plus rapidement si vous aviez utilisé des circuits intégrés.

Cela sous-entend-il que vous avez perdu votre temps ? Non, absolument pas, car vous deviez apprendre comment les résistances, les condensateurs et les transistors interagissaient entre eux.

Ces éléments de base appelés *composants passifs*, ou *composants discrets*, seront toujours utilisés dans les circuits de la suite de ce livre.

Les outillages, équipements, composants et fournitures détaillées ci-après seront utilisés dans les expériences 15 à 24, en complément de ceux que j'ai précédemment recommandés.

Fondamentaux : choix des circuits intégrés

Deux circuits intégrés sont représentés sur la figure 15-2. Celui du haut possède des broches espacées de 2,54 mm (0,1") lui permettant de s'insérer dans les trous de votre plaque de montage ou perforée, c'est la raison pour laquelle ils sont dits de type *traversant.* Je n'utiliserai que ce type de composants car ils sont faciles à manipuler. Le plus petit des deux est de type *CMS* (*Composant Monté en Surface,* ou *SMD* en anglais), je n'en utiliserai pas car ils ne peuvent pas être insérés dans une plaque de montage et sont difficiles à mettre en œuvre. (De nombreux CMS sont souvent de dimensions inférieures à celui que je vous montre.)

Le corps d'un circuit intégré s'appelle le boîtier, il est fait de plastique ou résine. Un composant traversant est le plus souvent de type DIP (*Dual-Inline Package*), signifiant qu'il possède une rangée de broches alignées de chaque côté de son boîtier.

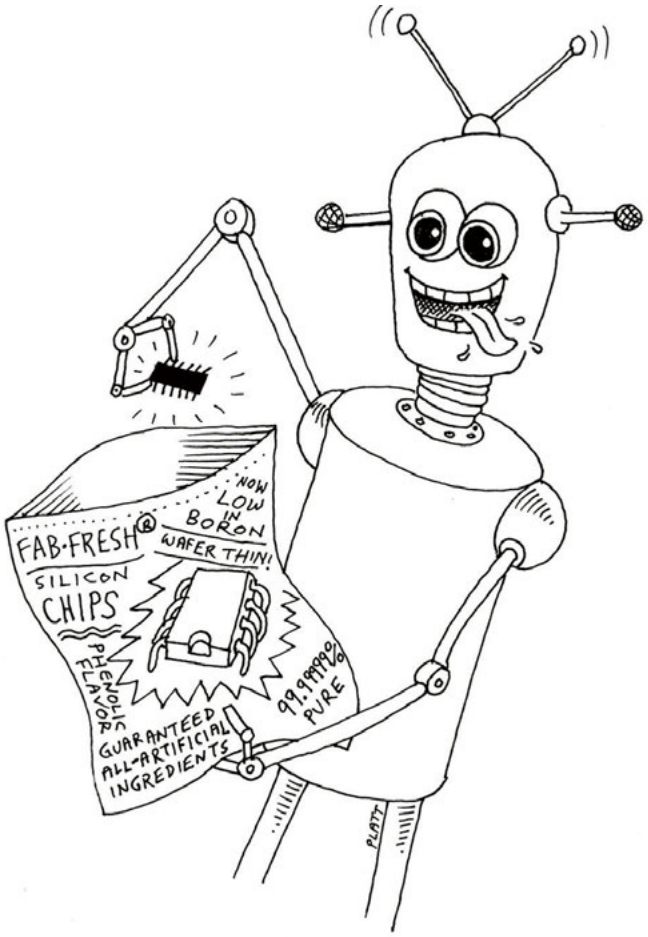


Figure 15-1. *Mon modèle caricatural.*

On le nomme *DIP*, ou *PDIP* si son boîtier est en plastique.

Les boîtiers des *composants CMS* sont souvent identifiés par un acronyme commençant par la lettre S, comme par exemple *SOIC*, qui signifie « *Small-Outline Integrated Circuit* ». De nombreux types de CMS existent, mais leur étude sort des objectifs de ce livre. En achetant vos composants, prenez la précaution de ne pas choisir, par erreur, des composants montés en surface. Voici mes recommandations :

> *Évitez les circuits intégrés dont le type de boîtier commence par la lettre S tels que SMT ou SMD. Évitez également les références commençant par SO, SOIC ou SSOP et les préfixes similaires tels que TSSOP ou TVSOP. Il s'agit de composants montés en surface qui nécessitent des moyens particuliers.*

Caché à l'intérieur de leur boîtier se trouve un circuit microscopique gravé dans une fine tranche de silicium. C'est de là que vient le nom « puce » (*chip* en anglais) qui désigne le composant dans son ensemble. Nous suivrons cette convention par la suite. De minuscules fils internes au boîtier relient le circuit aux broches qui dépassent de chaque côté du composant.

La puce PDIP de la figure 15-2 comporte 7 broches de chaque côté, formant un total de 14. D'autres circuits intégrés peuvent comprendre 4, 8, 16 broches, voire davantage.

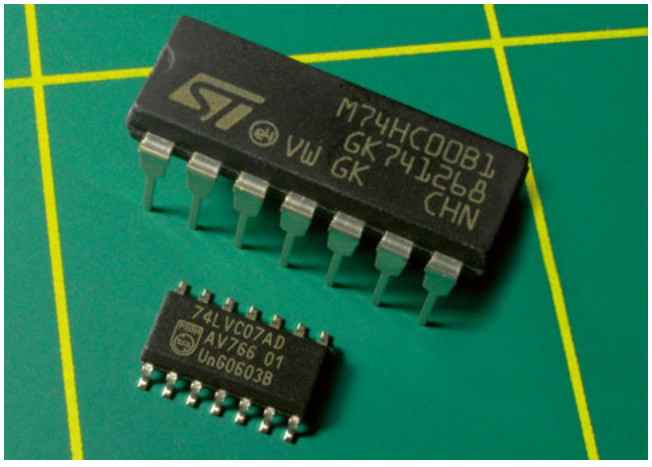


Figure 15-2. *Circuit intégré traversant (en haut), et composant monté en surface (en bas).*

Sur presque toutes les puces est imprimée leur référence. Sur la photo, vous remarquerez que bien qu'ils paraissent différents, les deux composants comportent « 74 » dans leurs désignations. C'est parce que tous deux sont des circuits intégrés logiques auxquels ont été attribuées des références à partir de 7400 lors de leur introduction il y a plusieurs décennies. Ils font partie de la *famille 74xx* et sont toujours très utiles.

Vous devez vous familiariser avec leurs références, j'ai préparé un résumé sur la figure 15-3. Les premiers caractères identifient le fabricant que vous pouvez ignorer car sans importance dans notre cas. Ensuite, vous avez les chiffres 74, qui identifient la « famille », après quoi vous trouvez deux lettres ou davantage (parfois trois), qui identifient la « génération » technologique de la famille. La famille 7400 a évolué en plusieurs générations comprenant 74L, 74LS, 74C, 74 HC et 74AHC. Il en existe d'autres, mais j'utiliserai la génération HC, car la plupart des puces 74xx sont disponibles dans cette génération, elles ne sont pas coûteuses, et n'utilisent pas beaucoup d'énergie. D'autres générations plus récentes offrent des vitesses plus élevées, mais dans notre cas, ce n'est pas nécessaire.

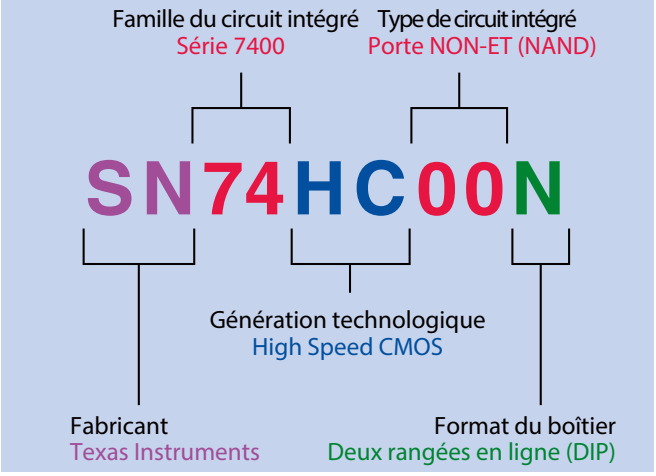


Figure 15-3. *Signification du marquage d'un circuit intégré de la famille 7400.*

Après les lettres identifiant la génération technologique, une série de deux, trois, quatre, parfois cinq chiffres identifie la fonction du circuit. Si vous voulez connaître la liste complète des fonctions disponibles, faites une recherche en

ligne pour : «`liste des circuits intégrés 74XX`» qui vous permettra de trouver une référence dans Wikipedia.

Pour terminer, la référence comportera une autre lettre, ou deux. La lettre N signifie que le circuit intégré est de format DIP, c'est une information importante si la puce neest pas représentée visuellement.

La raison de ces longues explications était de vous permettre deinterpréter les informations des catalogues lorsque vous achèterez vos circuits intégrés. Vous pouvez rechercher la famille «74 HC00», les moteurs de recherche des fournisseurs sont en général assez sophistiqués pour vous présenter des puces de plusieurs fabricants, même si leurs références comportent des lettres précédant et suivant votre argument de recherche.

Tous les circuits intégrés nécessaires aux expériences de ce chapitre du livre sont listés dans les tableaux de composants de l'annexe A.

Optionnel : support de circuits

Si vous avez l'intention d'immortaliser vos circuits en les soudant, je vous suggère d'éviter de souder directement vos puces, car il vous sera difficile de dessouder leurs multiples broches si vous commettez une erreur de câblage. Vous pouvez éviter cet inconvénient en utilisant des `supports DIP` comme ceux de la figure 15-4.

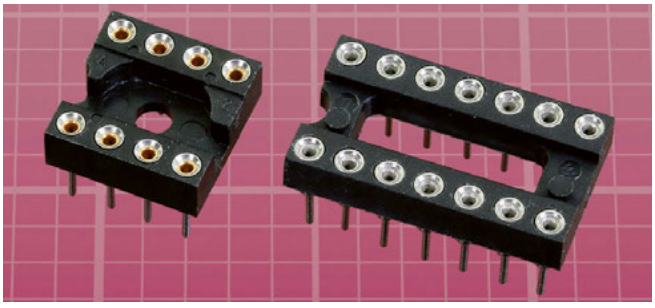


Figure 15-4. *Ces supports vous éviteront le risque de souder un circuit intégré de façon incorrecte.*

Vous soudez d'abord le support sur la plaque, puis vous insérez la puce dans le support, ainsi aucune soudure du composant n'est nécessaire. Pour les projets de ce livre, vous pouvez utiliser les supports les moins coûteux (il est inutile de choisir des supports avec contacts dorés, nettement plus coûteux).

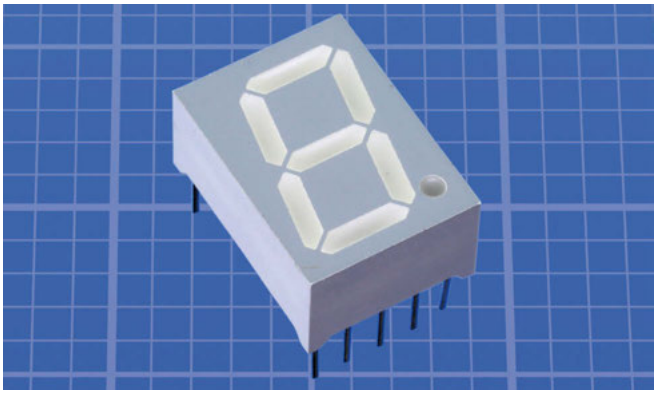


Figure 15-5. *Afficheur LED à 7 segments.*

Afficheurs numériques

Un de mes projets utilisant des circuits intégrés affichera sa sortie sur un *afficheur numérique à 7 segments* comme ceux que vous pouvez voir sur les horloges numériques ou les fours à micro-ondes, ou sur la figure 15-5. Pour les informations d'achat, voir l'annexe A.

Régulateur de tension

De nombreuses puces logiques fonctionnent sous une tension de 5 V CC. Pour l'obtenir, vous devrez ajouter un *régulateur de tension* à votre alimentation 9 V CC ou votre pile. Le régulateur accepte une tension d'entrée comprise entre 7,5 V CC et 12 V CC, et délivre une tension de sortie précisément égale à 5 V CC.

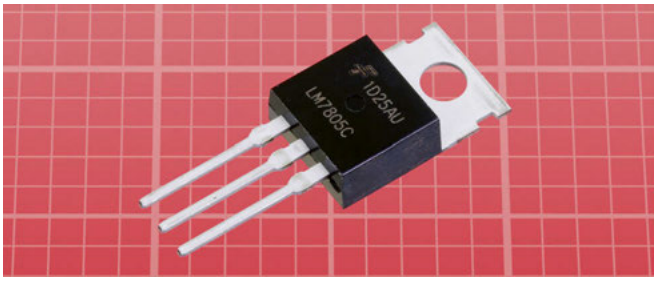


Figure 15-6. *Ce régulateur de tension délivre une tension de 5 V CC quand son entrée est alimentée par une tension comprise entre 7,5 V CC et 12 V CC.*

Le LM7805 n'est pas le régulateur le plus récent, mais il est robuste et peu coûteux. Sa référence sera précédée ou suivie par une abréviation identifiant le fabricant et le type de boîtier que vous pouvez ignorer si le boîtier ressemble à celui de la figure 15-6.

Diodes

La *diode*, qui est un des composants de base, n'a pas été nécessaire dans les expériences précédentes. Comme une LED (qui, vous vous en rappelez est une diode électroluminescente), elle laisse passer le courant dans un sens, mais elle le bloque dans l'autre. Contrairement à une LED, elle peut être très robuste. Une grosse diode sous-entend qu'elle peut accepter une intensité importante quand elle conduit et être soumise à une tension inverse élevée, tant que celle-ci est conforme à ses spécifications.

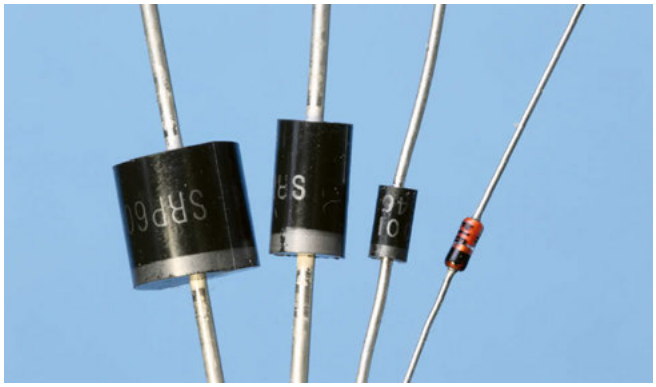


Figure 15-7. *Une sélection de diodes.*

L'extrémité de la diode qui doit être la plus négative s'appelle la *cathode*, elle est repérée par un anneau comme sur la figure 15-7. Dans le sens direct, le courant pénètre par l'autre extrémité nommée *anode*.

LED de faible puissance

Selon leurs fiches techniques, les circuits intégrés de la série HC ne peuvent pas délivrer une intensité supérieure à 4 mA. En réalité, selon l'un de mes amis travaillant dans l'industrie des semi-conducteurs, ils peuvent délivrer environ le double de ce courant, mais leurs fiches techniques n'ont jamais été mises à jour pour le préciser.

D'après mon expérience, je suis pratiquement certain que si vous voulez piloter une LED à partir de la sortie d'une puce de la série 74 HCxx, et que votre résistance en série permet le passage d'un courant de 10 mA, le circuit intégré va survivre. Ce que j'ignore, c'est de combien la tension de sortie va être diminuée par cette intensité excessive.

Ce point est important, car si vous utilisez la sortie d'une puce 74 HCxx pour piloter l'entrée d'un second circuit intégré 74 HCxx, ce dernier devra déterminer s'il reçoit un « niveau logique haut » ou un « niveau logique bas ». Si un autre composant (comme une LED), partage cette sortie dont il diminue la tension, une indétermination entre les puces pourrait se produire.

J'ai cependant pris la décision arbitraire suivante concernant les circuits de ce livre : le courant de sortie des broches logiques des circuits intégrés 74 HCxx ne devra pas dépasser 5 mA. Si vous souhaitez outrepasser cette règle, car vous souhaitez obtenir une plus forte luminosité de votre LED, le tout fonctionnera probablement correctement, mais je ne peux pas vous le garantir.

Puisque le courant sera plus faible, vous pensez peut-être pouvoir acheter des LED spéciales dont vous avez entendu parler, prévues pour des intensités plus faibles.

Allez-y ! Mais vous allez être déçu. J'ai testé une grande variété de LED et bien que celles prévues pour des intensités faibles fonctionnent avec un courant réduit, leur luminosité est une catastrophe. J'ai découvert que des LED rouges à forte intensité fonctionnaient mieux sous une intensité réduite à 2 mA. L'intensité lumineuse est mesurée en *millicandela* (abrégé *mcd*), et les LED prévues pour 400 mcd ou davantage devraient procurer une bonne luminosité.

Dans tous les cas, les LED rouges nécessitent une intensité plus faible sous une tension réduite, comparativement aux LED bleues ou blanches. Je vous suggère d'utiliser des LED rouges quand vous voulez les piloter par des puces logiques.

Encore une considération : certains circuits à base de puces, dans la suite du livre, comporteront de nombreux composants, laissant peu de place pour des LED de diamètre 5 mm. Aussi, à partir de maintenant, et pour la suite de ce livre, je vous recommande d'utiliser des LED de 3 mm dans les expériences.

Historique : l'origine des circuits intégrés

Avant que de vous suggérer des expériences pratiques avec des circuits intégrés, laissez-moi vous apprendre d'où ils proviennent.

Le spécialiste anglais des radars Geoffrey W. A. Dummer est à l'origine du concept d'intégration de petits composants à semi-conducteurs dans un boîtier miniaturisé. Il en a parlé pendant des années avant de tenter en vain d'en fabriquer un, en 1956. Le véritable premier circuit intégré n'a été réalisé que deux ans plus tard, en 1958 par Jack Kilby, qui travaillait chez Texas Instruments. La version de Kilby utilisait du germanium, élément déjà utilisé comme semi-conducteur. Mais Robert Noyce, visible sur la figure 15-8, eut une meilleure idée.

Né en 1927 dans l'Iowa, Noyce rejoint la Californie dans les années 1950 pour travailler avec William Schockley. C'était peu de temps avant que Schockley ne crée une société basée sur la fabrication des transistors qu'il avait co-inventés aux laboratoires Bell.

Noyce était l'un des huit employés déçus par le management de Schockley qu'il quitta pour fonder Fairchild Semiconductor. Alors qu'il était le directeur général de Fairchild, Noyce inventa le circuit intégré à base de silicium, qui évitait les problèmes de fabrication liés à l'utilisation du germanium. Il est reconnu comme étant l'homme qui a rendu possible la fabrication des circuits intégrés.

Les premières applications étaient réservées à des fins militaires, comme les missiles Minuteman qui nécessitaient des composants miniaturisés dans leur système de guidage. Ces applications ont utilisé la quasi-totalité des circuits intégrés produits de 1960 à 1963, période durant laquelle leur prix chuta d'environ 1 000 $ pièce à 25 $ de l'époque.

À la fin des années 1960, les puces de moyenne intégration firent leur apparition, chacune contenant des centaines de transistors. Les circuits intégrés à forte intégration ont permis de placer des milliers de transistors sur une seule puce, au milieu des années 1970. Aujourd'hui, certains composants comportent 50 milliards de transistors (et probablement davantage quand vous lirez ceci).

Robert Noyce cofonda Intel avec Gordon Moore, mais il mourut d'une crise cardiaque en 1990. Vous pouvez trouver davantage d'informations sur les fascinants pionniers de la conception des circuits intégrés sur le site de la Silicon Valley Historical Society :

www.siliconvalleyhistorical.org

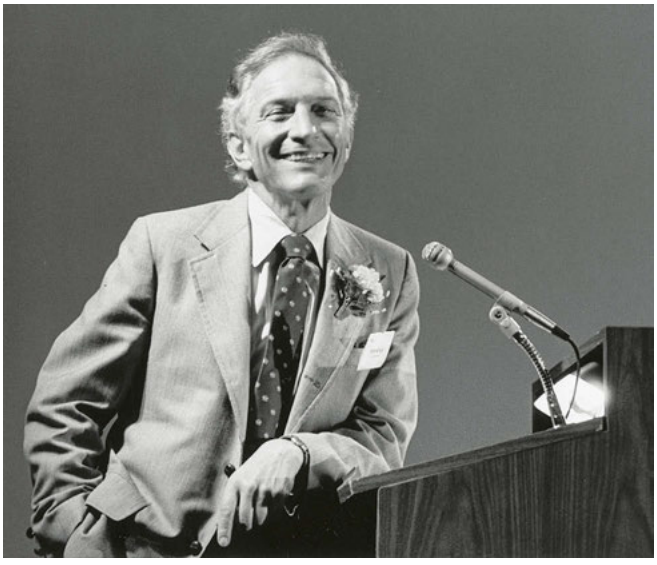


Figure 15-8. *Robert Noyce, qui breveta le circuit intégré, et également cofondateur d'Intel.*

Expérience 15

Génération d'une impulsion

Je vais commencer par le circuit intégré le plus réussi qui a été fabriqué : le *temporisateur 555*. Vous pourrez trouver de multiples guides le concernant en ligne, mais il y a trois raisons pour lesquelles j'en parle ici :

1. Il est incontournable. Vous devez absolument connaître ce temporisateur (timer). Encore récemment, certaines sources estimaient qu'on en fabriquait plus d'un milliard d'exemplaires par an. Il sera utilisé d'une façon ou d'une autre dans la plupart des circuits à venir de ce livre.

2. Il est très utile. Le 555 est probablement le circuit intégré le plus universel qui existe et ses applications sont innombrables. Sa sortie pouvant délivrer jusqu'à 200 mA peut piloter des charges importantes telles que des relais et des petits moteurs, de plus il est difficile de l'endommager.

3. Il est assez mal connu. J'ai lu des dizaines de manuels, en commençant par la fiche technique préliminaire de Signetics et parcouru divers documents de hobbyistes, j'ai constaté que son fonctionnement interne est rarement expliqué de façon claire. Vous en aurez ici une présentation graphique, pour que vous soyez en mesure d'en faire une utilisation créative.

Vous aurez besoin de :

- 1 source d'alimentation 9 V CC (pile ou adaptateur secteur)
- résistances : 470 ohms (1), 10K (3)
- condensateurs : 0,01 µF (1), 10 µF (1)
- 1 potentiomètre ajustable de 500K
- 1 circuit intégré temporisateur 555
- 1 interrupteur SPDT à glissière
- 2 interrupteurs tactiles

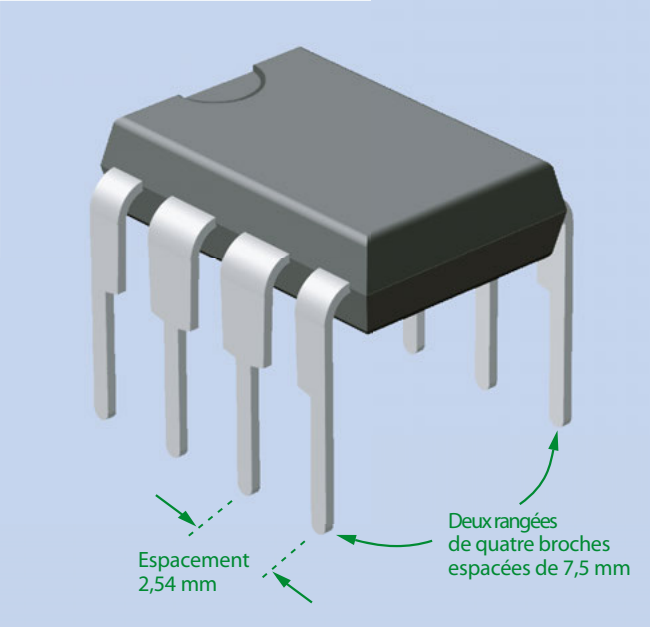


Figure 15-9. *Le temporisateur 555 est disponible en boîtier DIP à 8 broches.*

Reconnaissez votre circuit intégré

Vous allez utiliser le plus commun des boîtiers traversants du temporisateur 555 : le DIP 8, représenté sur la figure 15-9. C'est un carré d'environ 1,6 cm².

Une référence sera imprimée sur votre 555, par exemple NE555P ou KA555. Les deux lettres du préfixe identifient le fabricant (Texas Instruments ou On Semiconductor dans ces exemples), alors qu'une lettre à la fin indique les particularités du composant, comme par exemple la plage de températures qu'il supporte.

La figure 15-10 indique les informations relatives aux fonctions des broches d'un circuit intégré 555 selon sa vue de dessus. Ces informations sont souvent appelées le *brochage* d'une puce.

Dans tous les circuits intégrés que je vais utiliser, les broches sont numérotées en commençant par 1 en haut et à gauche (sur la vue de dessus) et la numérotation continue dans le sens inverse des aiguilles d'une montre. Mais savez-vous comment orienter le boîtier de la puce ?

Une encoche dans le boîtier en plastique identifie le haut du circuit intégré, vous devrez l'orienter vers le haut de votre plaque de montage. Parfois, vous trouverez un cercle gravé identifiant la broche 1, mais certains fabricants n'ajoutent pas ce repère.

> *L'encoche dans le boîtier de chaque circuit intégré traversant doit être orientée vers le haut de votre plaque de montage.*

Habituellement (mais pas toujours), l'espacement horizontal entre les deux rangées de broches d'un boîtier DIP est de 7,5 mm (0,3"), ce qui permet à ces composants de s'insérer aisément au-dessus de la séparation médiane des plaques d'essais, vous donnant accès à chaque broche du circuit. C'est la raison pour laquelle une plaque de montage est conçue de cette manière.

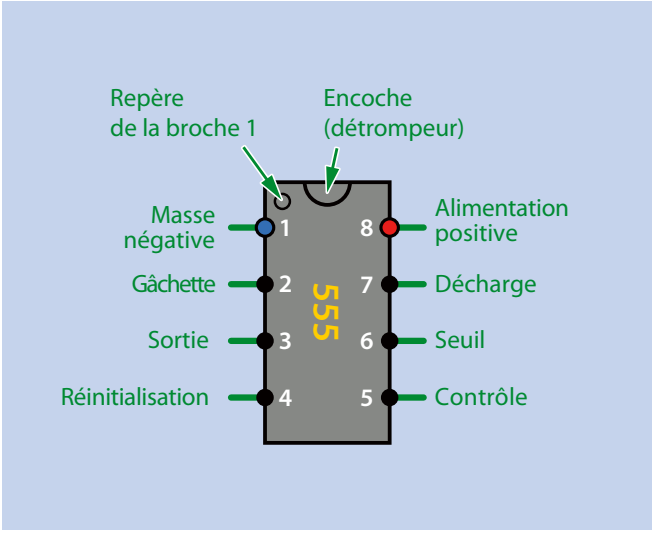


Figure 15-10. *Brochage d'un temporisateur 555.*

Test du multivibrateur monostable

La figure 15-11 représente le premier circuit que je voudrais vous faire réaliser, afin de tester le fonctionnement du circuit en mode ***monostable***. Dans ce mode, quand le temporisateur est déclenché par un changement de tension sur l'une de ses broches, il génère une impulsion unique sur une autre broche.

Le temporisateur peut également être configuré en mode ***astable***, il génère alors un train d'impulsions comme le multivibrateur que vous avez réalisé dans l'expérience 10, mais je n'aborderai pas ce sujet avant l'expérience 16.

> *Dans cette expérience, je vais commencer à utiliser les doubles bus de votre plaque de montage qui vont me permettre de simplifier le câblage du circuit. Selon ce principe, la figure 15-11 comprend deux longs fils de pontage en haut de la plaque, afin de distribuer les pôles positif et négatif de l'alimentation des deux côtés. Soyez attentif à bien observer la polarité de la source d'alimentation quand vous alimentez un circuit comprenant des puces, car vous pourriez les endommager de façon irréversible.*

En câblant ce circuit, n'oubliez pas d'inclure le petit fil de pontage vert de 2,54 mm situé du côté droit du circuit intégré. Comptez attentivement les trous quand vous insérez les composants. Reliez l'alimentation, rien ne se passe, car le temporisateur attend que vous le déclenchiez.

Tournez le potentiomètre ajustable au milieu de sa course. Appuyez, puis relâchez le bouton-poussoir situé en haut, la LED devrait s'allumer. Elle restera ainsi pendant un temps fixe, après quoi elle s'éteindra seule.

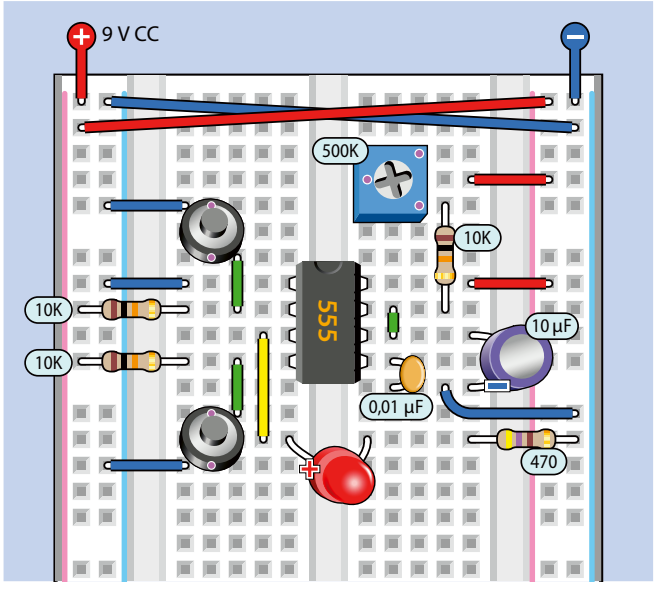


Figure 15-11. *Test du temporisateur 555 en mode astable.*

Revenez à la figure 15-10, vous noterez que la broche 2 du temporisateur s'appelle « gâchette » (*trigger* en anglais sur la fiche technique). Sur la figure 15-11, cette broche est reliée au bus positif de la partie gauche de la plaque de montage, au travers d'une résistance de 10K. Peut-être vous rappelez-vous que dans le chapitre 2, je vous ai présenté le concept de la résistance de tirage (*pullup* en anglais). En voici un exemple. Elle a pour rôle de maintenir la gâchette du temporisateur au niveau du pôle positif de l'alimentation, jusqu'à ce que le bouton soit appuyé ce qui la relie à la masse négative, contrecarrant l'action de la résistance de 10K. La brusque chute de tension déclenche le temporisateur qui génère alors une impulsion positive sur sa broche 3 qui alimente la LED par le fil de pontage jaune.

- Une tension positive sur la broche de la gâchette empêche le temporisateur d'être déclenché.
- En reliant la gâchette à la masse, le temporisateur est déclenché.
- La LED s'allumera pour un temps déterminé après avoir appuyé, puis relâché le bouton.

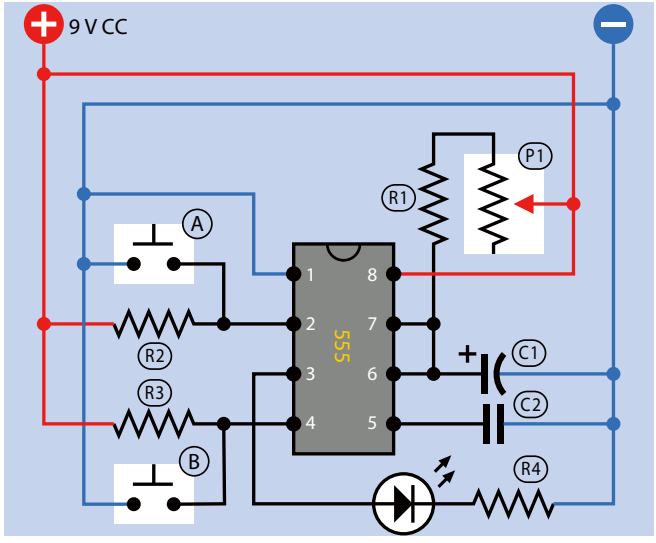


Figure 15-12. *Schéma du circuit de la figure 15-11.*

Le schéma du circuit, avec la désignation des différents composants, se trouve sur la figure 15-12. La durée de l'impulsion de ce circuit est réglée en modifiant la position de l'axe du potentiomètre ajustable P1. Vous pouvez également utiliser un condensateur différent, car, vous l'avez sûrement noté, C1 accumule une charge au travers de P1 + R1 qui forment un réseau RC.

Voici un autre essai que vous pouvez faire. Réglez P1 afin d'obtenir une impulsion longue, actionnez le bouton A, puis maintenez appuyé le bouton B. Cela annule la sortie. Si vous maintenez le bouton B appuyé et que vous actionnez à nouveau le bouton A, rien ne se passe.

La broche 4 est le signal de réinitialisation du temporisateur. Tant que la broche 4 est maintenue à une tension positive proche de la tension d'alimentation par la résistance de tirage de 10K, le temporisateur pourra être déclenché. Si vous reliez la broche 4 à la masse (à un niveau proche de la masse négative), rien ne se passera jusqu'à ce qu'elle ne soit plus au potentiel de la masse. La broche 4 doit donc être maintenue au niveau haut afin de permettre au temporisateur de fonctionner.

*Quand le temporisateur fonctionne en mode monostable, la broche 4 doit être toujours maintenue au niveau **haut** (proche de la tension d'alimentation). Si elle n'est pas reliée, elle est **flottante**, ce qui pourrait provoquer un comportement imprévisible.*

La figure 15-13, montre graphiquement le comportement du temporisateur. Le 555 convertit le monde imparfait qui l'entoure, en une sortie précise et synchronisée. Il répond si rapidement que son comportement paraît être instantané.

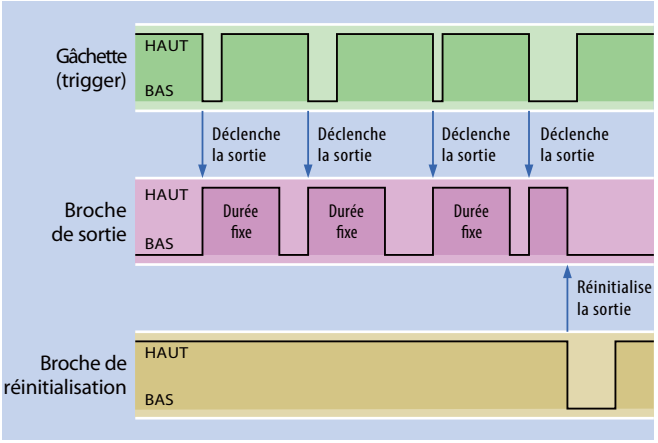


Figure 15-13. *Effets de la gâchette et de la broche de réinitialisation sur la sortie du temporisateur.*

Dans mon résumé du fonctionnement, j'ai utilisé les termes « proche de la tension d'alimentation » et « proche du niveau de la masse négative », mais de combien « proche » doit être proche ?

- Le temporisateur 555 considère que sur sa gâchette, toute tension supérieure aux deux tiers de la tension d'alimentation est un niveau « haut », alors que toute tension inférieure à un tiers de la tension d'alimentation est un niveau « bas ».

- Sur la broche de réinitialisation (*reset*), vous devez appliquer une tension inférieure au tiers de la tension d'alimentation pour obtenir la réinitialisation. Les temporisateurs d'autres fabricants manquent de précision à ce sujet.

Encore un dernier test. Actionnez le bouton B, maintenez le bouton A enfoncé après la fin de la « durée de l'impulsion ». Ceci prolonge l'impulsion du temporisateur. Celle-ci demeure au niveau « haut » jusqu'à ce que vous relâchiez le bouton A. Les fiches techniques indiquent que ce comportement est une « resynchronisation » automatique du temporisateur.

Le maintien d'une tension faible (niveau bas) sur la gâchette d'un temporisateur permet de prolonger l'impulsion de sortie indéfiniment.

Comment tout cela fonctionne-t-il ? Utilisez votre multimètre afin d'évaluer le comportement du temporisateur. Sur la figure 15-12, réglez P1 afin d'obtenir une impulsion relativement longue, puis mesurez la tension par rapport à la masse, sur le fil positif de C1, le condensateur de 10 µF. Vous devriez constater que la tension augmente jusqu'à atteindre environ 6 volts, puis elle diminue brusquement. Où s'écoule-t-elle ? La broche 7 du 555 est appelée broche de décharge, elle permet de décharger le condensateur à l'intérieur de la puce. Je décrirai très prochainement, en détail, le fonctionnement interne du circuit intégré.

Vous pouvez également utiliser votre multimètre pour mesurer la sortie broche 3 du temporisateur quand celui-ci a été déclenché. La tension atteint environ 8 volts, mais pas plus. Le temporisateur contient de nombreux transistors qui absorbent une partie de la tension de la même façon que les transistors NPN étudiés précédemment.

Pour terminer, quel est le rôle de C2, le condensateur de 0,01 µF relié à la broche 5. Il s'agit de la broche de contrôle qui, quand vous lui appliquez une tension intermédiaire, permet d'ajuster la longueur de l'impulsion de sortie du temporisateur. Du fait que nous n'utilisons pas encore cette possibilité, il est prudent de relier la broche 5 à un condensateur de 0,01 µF, dans le but d'éviter les fluctuations de tension qui pourraient interférer avec le fonctionnement normal. Vous pourrez trouver de nombreux schémas de circuits dans lesquels C2 n'est pas présent, mais je le prévois toujours, par sécurité.

Attention à l'ordre des broches

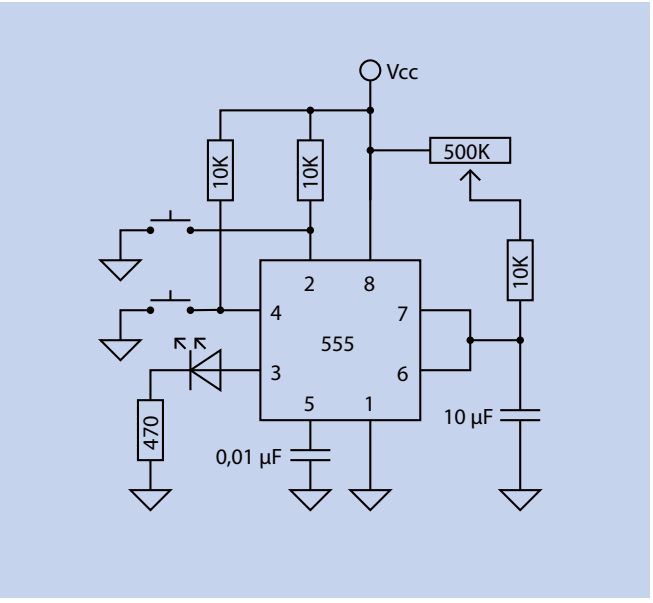


Figure 15-14. *Ce circuit est fonctionnellement identique au circuit de test de la figure 15-12. Remarquez que Vcc désigne la tension d'alimentation, et que les triangles orientés vers le bas sont les masses négatives.*

Dans tous les schémas de ce livre, les circuits intégrés sont représentés comme vous pouvez les voir sur une plaque de montage, leur encoche pointée vers le haut, et leurs broches dans l'ordre de numérotation. Les schémas des sites web, ou d'autres livres, font parfois différemment. Les broches peuvent être inversées et leur séquence différente, afin de pouvoir représenter la tension d'alimentation en haut,

et respecter le sens conventionnel du courant s'écoulant généralement vers le bas. Pour vous donner un exemple, le circuit de la figure 15-14 est fonctionnellement identique à celui de la figure 15-12. Il vous permet de comprendre rapidement ce que le circuit fait, mais si vous devez le réaliser sur une plaque de montage, vous devrez dessiner un plan intermédiaire pour déterminer comment placer les composants. *L'électronique en pratique* est un ouvrage d'initiation pratique, c'est pourquoi mes schémas suivent la configuration des plaques de montage.

Technique : durée des impulsions

Dans l'expérience 9, quand vous avez fait votre propre réseau RC, vous avez dû faire des calculs un peu ennuyeux, afin de déterminer le temps nécessaire à un condensateur pour atteindre une tension particulière. Tout est simplifié en utilisant un temporisateur 555 : vous pouvez déterminer la durée de ses impulsions de sortie à l'aide d'une table comme celle de la figure 15-15.

	10K	22K	47K	100K	220K	470K	1M
1000 µF	11	24	52	110	240	520	1100
470 µF	5,2	11	24	52	110	240	520
220 µF	2,4	5,2	11	24	52	110	240
100 µF	1,1	2,4	5,2	11	24	52	110
47 µF	0,52	1,1	2,4	5,2	11	24	52
22 µF	0,24	0,52	1,1	2,4	5,2	11	24
10 µF	0,11	0,24	0,52	1,1	2,4	5,2	11
4,7 µF	0,052	0,11	0,24	0,52	1,1	2,4	5,2
2,2 µF	0,024	0,052	0,11	0,24	0,52	1,1	2,4
1,0 µF	0,011	0,024	0,052	0,11	0,24	0,52	1,1
0,47 µF		0,011	0,024	0,052	0,11	0,24	0,52
0,22 µF			0,011	0,024	0,052	0,11	0,24
0,1 µF				0,011	0,024	0,052	0,11
47 nF					0,011	0,024	0,052
22 nF						0,011	0,024
10 nF							0,011

Figure 15-15. *Durée en secondes des impulsions d'un temporisateur 555 en mode monostable, selon les valeurs de la résistance et du condensateur de temporisation. Les durées sont arrondies à deux décimales.*

Dans le circuit que vous avez réalisé, la valeur totale du potentiomètre et de sa résistance reliée en série contrôle le temps de charge du condensateur. Cette valeur totale est indiquée en haut du la tableau. La valeur du condensateur C1 indiquée dans la colonne de gauche de la table indique la durée approximative de l'impulsion en secondes.

Le temporisateur 555 est une création au design incroyable. On peut faire varier la résistance et le condensateur de temporisation, ainsi que la valeur de la tension d'alimentation dans des proportions importantes, la puce délivrera toujours des résultats identiques et précis. Il suffit de suivre ces quelques recommandations :

- N'utilisez pas une résistance de faible valeur entre le pôle positif de l'alimentation et la broche de décharge. Il en résulterait une consommation électrique excessive. Le minimum absolu est 1K, je suggère d'utiliser une résistance de 10K.
- Si vous utilisez un condensateur de temporisation de valeur supérieure à 1 000 µF, ses fuites internes influent beaucoup sur son temps de charge qui devient imprécis.
- Le temporisateur 555 nécessite une tension d'alimentation comprise entre 5 V CC et 16 V CC. Il devient peu fiable au-delà de ces limites.

Que faire si vous voulez une durée non présente dans la table ? Il existe une formule simple dans laquelle `T` est la durée de l'impulsion en *secondes*, `R` est la résistance de temporisation en *kilohms*, et `C` le condensateur de temporisation en *microfarads* :

```
T = R * C * 0,0011
```

Si vous connaissez la durée souhaitée et avez un condensateur, pour connaître la valeur de la résistance à utiliser, réarrangez la formule ainsi :

```
R = T / ( C * 0,0011 )
```

Si votre condensateur vaut 47 µF, `C = 47`. Et que vous souhaitez obtenir une impulsion de 3 secondes, `T = 3`. La formule devient :

```
R = 3 / ( 47 * 0,0011 )
```

L'opération `47 * 0,001` donne `0,0517`, en divisant `3` par cette valeur, on obtient environ `58`. Vous devez donc utiliser une résistance de 58K qui n'est pas une valeur standard,

mais les résistances de 56K sont courantes. Vous pourriez le faire de façon plus simple : utilisez un potentiomètre ajustable de 100K, réglez-le à mi-course, puis affinez son réglage afin d'obtenir précisément une impulsion de 3 secondes.

Faites attention de ne jamais réduire la résistance totale de temporisation à zéro. C'est pour cette raison que j'ai placé une résistance de 10K en série avec le potentiomètre ajustable dans les figures 15-11 et 15-12. Ainsi, même si le potentiomètre est réglé au minimum de sa valeur, la résistance de 10K est toujours présente. Si elle ne l'était pas, le condensateur serait relié directement à la tension d'alimentation et se chargerait instantanément et ne pourrait jamais se décharger. Pire, la broche de décharge serait directement reliée au pôle positif de l'alimentation ce qui endommagerait la puce.

Prévoyez toujours une résistance entre la broche 7 et l'alimentation positive d'un temporisateur 555. Je recommande une résistance de 10K.

À l'intérieur du 555 en mode monostable

Je pense que si vous connaissez le fonctionnement interne du temporisateur 555, son utilisation vous sera facilitée. Le boîtier en plastique de la puce contient trop de transistors pour que je puisse vous les montrer, mais je peux résumer la façon dont ils fonctionnent, comme le montre la figure 15-16.

Au cœur du temporisateur se situe une ***bascule*** (*flip-flop*) qui est un circuit transistorisé fonctionnant comme un interrupteur bidirectionnel. De fait, je l'ai représenté ainsi dans le diagramme, afin de le comprendre plus facilement. La bascule est pilotée par deux circuits ***comparateurs***, identifiés A et B.

Chaque comparateur compare deux tensions et change sa sortie selon la tension qui est la plus élevée.

Le comparateur A compare la tension de la broche 2 (la gâchette) avec une tension fixe égale à un tiers de la tension d'alimentation. Quand la broche 2 devient ***inférieure*** à ce niveau, le comparateur positionne la bascule afin que la sortie, broche 3, soit positive.

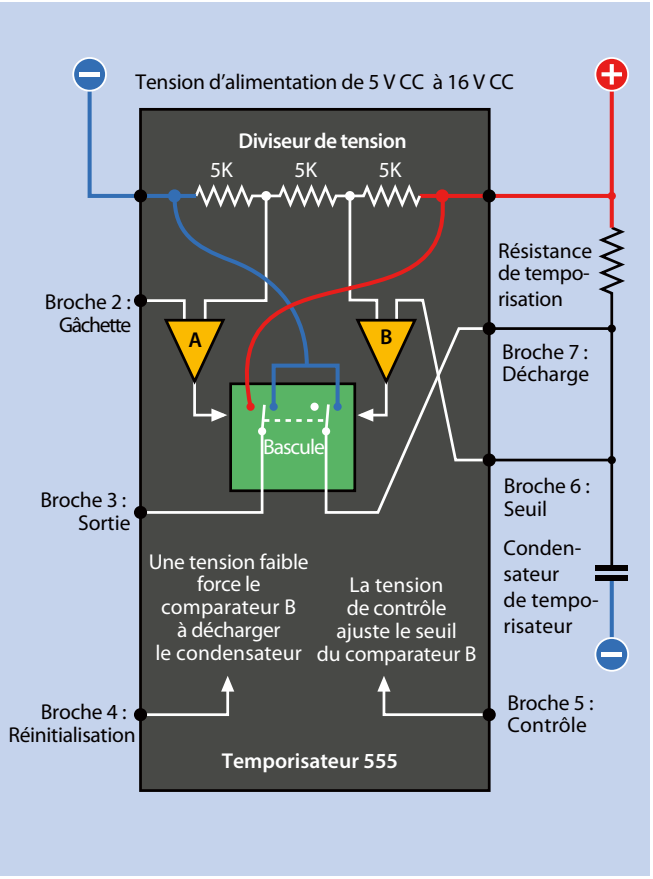


Figure 15-16. *Constitution interne du temporisateur 555.*

Le comparateur B compare la tension de la broche 6 (seuil), avec une tension fixe égale aux deux tiers de la tension d'alimentation. Quand la broche 6 devient ***supérieure*** à ce niveau, le comparateur B positionne la bascule afin que la sortie, broche 3, soit au niveau de la masse. La broche 7 étant reliée au condensateur de temporisation, le condensateur se décharge dans la puce. C'est ce qui se passe à la fin de l'impulsion de sortie du temporisateur.

Supposons qu'initialement, le temporisateur ait été déclenché par un niveau bas sur la broche 2. Le comparateur le détecte et positionne la bascule vers la gauche ce qui débute une impulsion positive et déconnecte de la masse le condensateur de temporisation. Le condensateur commence alors à se charger jusqu'à ce qu'il dépasse les deux tiers de la tension d'alimentation. Le comparateur le

détecte et positionne la bascule vers la droite. Ceci termine l'impulsion et relie le condensateur à la masse.

Néanmoins, à n'importe quel instant durant l'impulsion, un niveau bas sur la broche 4 peut forcer l'état du temporisateur et obliger le comparateur B à positionner la bascule vers la droite et décharger le condensateur pendant que la sortie de la puce est mise au niveau bas.

Une tension variable sur la broche 5 modifie la tension de référence du comparateur B permettant d'augmenter ou diminuer la tension provoquant la décharge du condensateur. Cela présente peu d'intérêt lorsque le temporisateur est utilisé en mode monostable, mais offrira de nombreuses possibilités quand le temporisateur sera utilisé en mode astable.

Suppression de l'impulsion initiale

Quand le temporisateur est configuré en mode monostable, une impulsion peut être générée spontanément à sa mise sous tension, même s'il n'a pas encore été déclenché. Cela peut parfois être gênant, mais une solution simple existe. Ajoutez un condensateur de 1 µF entre la broche de réinitialisation et la masse. Ce condensateur absorbe le courant de la broche au moment où la tension d'alimentation est appliquée, et le maintien au niveau de la masse pendant une fraction de seconde, juste assez longtemps pour empêcher le temporisateur de générer une impulsion parasite de départ. Après que le condensateur est chargé, il n'a plus d'effet, et la résistance de tirage de 10K maintient la broche de réinitialisation positive, le condensateur n'interfèrera plus avec le fonctionnement du circuit. La figure 15-17 montre l'endroit où vous devez ajouter le condensateur de 1 µF, en bas à gauche du circuit de test en mode monostable.

J'utiliserai ce concept de suppression de l'impulsion initiale dans les expériences suivantes.

En quoi un 555 peut être utile ?

Que peut-on faire avec l'impulsion de longueur fixe mais programmable d'un temporisateur 555 ? Imaginez le temporisateur contrôlant d'autres composants ; comme par exemple, un éclairage extérieur qui pourrait durer un temps déterminé, après avoir été déclenché par un détecteur de mouvement. Un temporisateur pourrait également contrôler un grille-pain ou faire clignoter la guirlande lumineuse d'un sapin de Noël. L'Apple II, le premier ordinateur conçu par Apple Computer utilisait un 555 pour le clignotement de son curseur. Dans les prochains projets, vous verrez l'utilisation que je fais d'un temporisateur dans de nombreuses situations surprenantes.

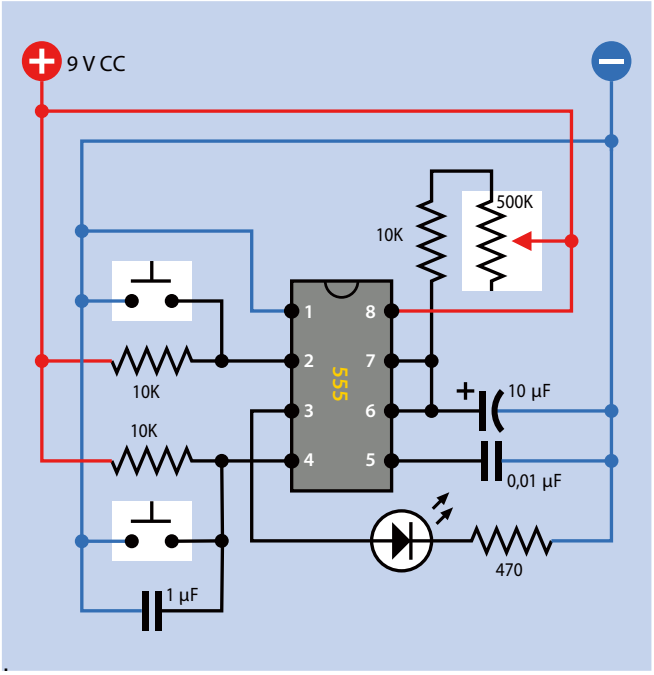


Figure 15-17. *Un condensateur destiné à éviter l'impulsion initiale du temporisateur est ajouté en bas et à gauche.*

Les microcontrôleurs sont utilisés dans de nombreuses applications où un temporisateur 555 était précédemment utilisé, comme par exemple le délai réglable du balayage intermittent des essuie-glaces d'une voiture, ou d'un four à micro-ondes. Mais un microcontrôleur doit être programmé, alors que quand on développe un circuit, l'utilisation d'un temporisateur 555 peut se révéler plus rapide et simple. De plus, il peut délivrer dix fois plus de puissance qu'un microcontrôleur.

Quand nous étudierons l'alarme anti-intrusion de l'expérience 17, nous aurons besoin d'un délai de 30 secondes avant que l'alarme soit armée, pour que vous puissiez sortir et fermer la porte. Il faudra un autre délai de 30 secondes à votre retour afin de pouvoir mettre l'alarme hors fonction. J'utiliserai une puce 555 pour ces deux délais.

L'expérience que vous venez de faire était banale, mais elle ouvre la porte à de nombreuses possibilités.

Le mode bistable

Il existe une autre possibilité d'utilisation du temporisateur, connu sous le nom de « mode bistable », représenté sur la figure 15-18. C'est semblable au circuit de la figure 15-11, mais les composants de temporisation ont été retirés, et la broche 6 est reliée à la masse. Pourquoi faire cela ?

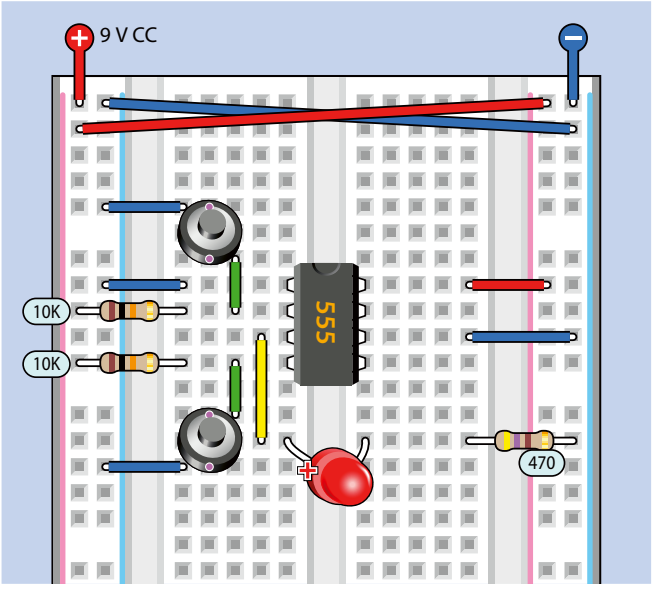


Figure 15-18. *Le temporisateur est maintenant câblé en mode bistable.*

Actionnez brièvement le bouton A, la LED s'allume. Pour quelle durée ? Aussi longtemps que le circuit reste alimenté. La sortie du temporisateur reste indéfiniment stable.

Actionnez maintenant le bouton B, le LED s'éteint. Pour quelle durée ? Aussi longtemps que le circuit reste alimenté.

Normalement, quand vous déclenchez le temporisateur, son impulsion de sortie se termine quand le condensateur relié à la broche 6 se charge aux deux tiers de la tension d'alimentation. Mais ici, le condensateur a été supprimé et la broche 6 est reliée à la masse, elle ne peut donc jamais atteindre les deux tiers de la tension d'alimentation. En conséquence, quand vous déclenchez le temporisateur, son impulsion de sortie ne se termine jamais.

Vous pouvez néanmoins supprimer la sortie en appuyant sur le bouton B afin d'appliquer un niveau bas sur la broche de réinitialisation, mais quand l'impulsion a disparu, il n'y a aucune raison pour qu'elle ne réapparaisse. La broche 2 comporte une résistance de tirage évitant que le temporisateur ne soit déclenché avant que vous n'actionniez le bouton A.

Cette configuration est nommée bistable, car elle se maintient de façon stable dans un de ses deux états de sortie, au niveau haut, ou au niveau bas. Il s'agit d'un comportement similaire à celui d'une bascule, on le nomme également *verrou* (*latch* en anglais).

Pourquoi auriez-vous besoin d'un temporisateur 555 se comportant ainsi ? Parce que, vous pourriez avoir besoin d'une application qui démarre en actionnant un bouton et qui est stoppée en actionnant un autre bouton. Ma lampe de bureau fonctionne de cette manière, tout comme la scie à ruban de mon atelier. Quand nous étudierons le circuit du testeur de réflexes de l'expérience 18, vous verrez qu'il est mis en marche et réinitialisé par un temporisateur en mode bistable.

Dans ce circuit, il est possible de laisser les broches 5 et 7 non reliées (flottantes), car je pousse le temporisateur dans des états extrêmes où n'importe quel signal de ces broches sera ignoré. C'est un cas où des broches flottantes sont acceptables.

Le mode inversé

Voici un mode de fonctionnement supplémentaire du temporisateur 555. En *mode inversé*, la sortie du temporisateur est inversée, c'est-à-dire qu'elle passe au niveau bas quand son entrée est haute, et au niveau haut quand son entrée est basse. C'est un fonctionnement similaire à celui du circuit bistable, à l'exception qu'il ne se verrouille pas de lui-même dans un état stable ou l'autre.

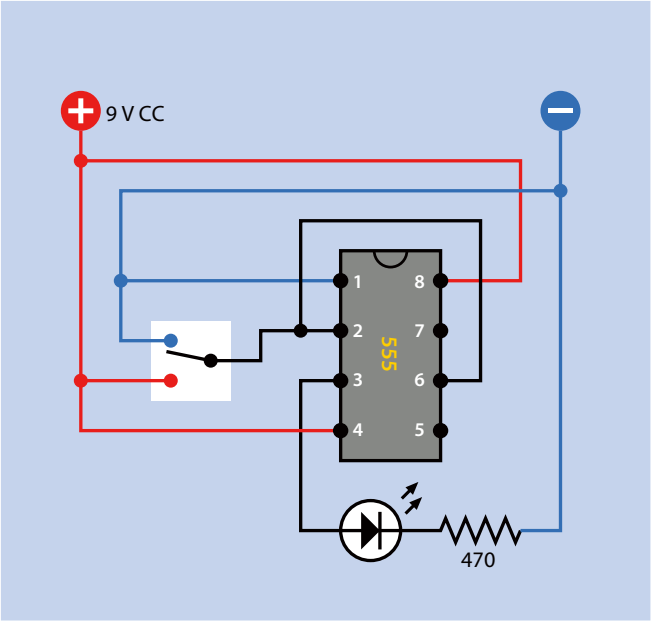


Figure 15-19. *Un temporisateur 555 configuré en mode inversé.*

Vous pouvez vous procurer une puce de la famille 74xx, un *inverseur*, qui remplit cette fonction, mais c'est un circuit intégré logique dont le courant de sortie est limité. La sortie à 200 mA d'un temporisateur 555 conviendra si vous avez besoin de davantage de courant, par exemple pour piloter un relais ou un petit moteur.

Pour quelle raison vouloir inverser une entrée ? C'est parfois utile. Il se peut que vous conceviez un circuit dans lequel une entrée au niveau bas doive créer une sortie haute, et qu'une entrée au niveau haut génère une sortie au niveau bas. La figure 15-19 montre un temporisateur configuré ainsi.

Remarquez que les broches 2 et 6 sont reliées ensemble de façon à ce que l'entrée de la broche 2 soit également appliquée à la broche 6. Rappelez-vous que la broche 2 est déclenchée par un niveau bas et ignore un niveau haut, alors que la broche 6 ignore un niveau bas, mais est activée par un niveau haut (car elle est conçue pour répondre au niveau de charge d'un condensateur). En conséquence, quand l'entrée est haute, la broche 6 réagit en portant la sortie au niveau bas. Quand l'entrée est au niveau bas, la broche 2 réagit en générant une impulsion positive, de durée infinie, sur la broche de sortie. J'ai utilisé un interrupteur bidirectionnel pour générer le signal d'entrée, rappelez-vous que la broche 2 doit être à un niveau haut ou bas, mais elle ne doit pas être flottante.

Je connais une façon très pratique de réaliser ce circuit en utilisant une puce 556. Ce circuit intégré contient deux temporisateurs 555 en un seul boîtier. Si vous utilisez le premier temporisateur de façon conventionnelle, vous pouvez inverser sa sortie en l'appliquant comme entrée du second temporisateur configuré en mode inversé comme je viens de le décrire. Je vous laisse le soin de vous informer sur le circuit intégré 556, si vous êtes intéressé.

Par ailleurs, un temporisateur en mode inversé peut offrir une fonction très utile en convertissant un signal variable en une sortie définitivement haute ou basse, avec un effet d'*hystérésis* que j'explique ici, car je n'aurai pas l'opportunité de le faire par la suite, dans ce livre.

Fondamentaux : l'hystérésis

Supposez que vous ayez un thermostat qui contrôle la mise en marche d'un système de chauffage, quand la température diminue à 18 degrés centigrades. Voudriez-vous que le thermostat stoppe le chauffage quand la température atteint 18,01 degrés ? Probablement pas : le système ne fonctionnerait pas efficacement s'il s'arrêtait presque aussitôt après avoir été mis en marche. De façon courante, un thermostat attend que la température soit de 19 ou 20 degrés pour arrêter le chauffage.

La température est maintenant de 20 degrés, et le chauffage est stoppé. Voudriez-vous qu'il se remette en fonctionnement quand la température atteindra 19,99 degrés ? Non, absolument pas, vous préférerez attendre que la température redescende à 18 degrés.

Un thermostat peut se comparer à un interrupteur à verrouillage qui se maintient activé pendant que la température augmente, puis se maintient désactivé quand la température diminue. Ce comportement s'appelle l'hystérésis, c'est très utile quand vous avez une entrée fluctuante (analogique) qui doit être convertie en une sortie « active ou non ».

Un temporisateur 555 configuré en mode inversé fonctionne ainsi. Si vous remplacez l'interrupteur par une tension variant lentement, diminuant jusqu'au tiers de la tension

d'alimentation, la sortie du temporisateur passe au niveau haut. Si la tension d'entrée augmente à nouveau, la sortie reste haute jusqu'à ce que la tension atteigne les deux tiers de la tension d'alimentation. Cela remet la sortie au niveau bas et elle le demeure jusqu'à ce que la tension de la broche 2 chute jusqu'à atteindre le tiers de la tension d'alimentation.

Certains circuits intégrés sont conçus spécifiquement avec une hystérésis interne. Ils utilisent le plus souvent un circuit d'entrée nommé ***bascule de Schmitt*** (*Schmitt trigger*). Mais je m'éloigne de mes objectifs, je vous laisse le soin de vous informer à ce sujet.

Historique : naissance du temporisateur

Le développement du temporisateur 555 est une histoire incroyable. En 1970, alors que seulement une demi-douzaine d'entreprises étaient implantées dans la Silicon Valley, la société Signetics achète une idée de l'ingénieur Hans Camenzind (figure 15-20). Le concept ne constitue pas une avancée décisive : seulement 23 transistors et un groupe de résistances qui émettent une impulsion unique ou une série d'impulsions. Celui-ci est polyvalent, stable et simple, mais ses vertus n'étaient pas la raison principale de l'acquisition… Grâce à la technologie naissante des circuits intégrés, Signetics parvient à reproduire l'ensemble sur une puce de silicium. Quel magnifique concept !

Hans Camenzind travaille seul, comme consultant indépendant, développant l'ensemble à grande échelle sur une plaque de montage, à l'aide de transistors, de résistances et de diodes. Une fois que l'ensemble fonctionne, il commence à attribuer des valeurs légèrement différentes aux composants afin de contrôler si le circuit accepte des variations de production, ou pour d'autres raisons, comme les variations de température lors de l'utilisation de la puce. Il crée au moins 10 versions du circuit, ce qui l'occupe pendant des mois.

Puis Camenzind s'assied à une table à dessin et utilise un couteau X-Acto particulier pour graver le circuit sur une grande feuille de plastique opaque. Il n'a pas pu utiliser un ordinateur pour dessiner le plan, il n'y avait pas d'ordinateurs de bureau dans les années 1970.

Signetics réduit ensuite l'image photographiquement selon un rapport 300 :1, la grave sur de minuscules tranches de matériau semi-conducteur et insère chacune d'elles dans un rectangle en plastique d'un-demi pouce (1,27 cm) avec la référence du produit imprimée sur la partie supérieure. Le directeur des ventes le baptise 555 car il avait l'intuition que cette puce serait un succès, et il souhaitait que sa référence soit facilement mémorisable.

Commercialisée en 1971, elle s'avère être la puce la plus fructueuse de l'histoire, à la fois par le nombre d'unités vendues (des dizaines de milliards), que par la longévité du concept (identique depuis plus de 50 ans).

Aujourd'hui, les puces sont conçues par des équipes importantes et testées en simulant leur comportement à l'aide de logiciels. Ainsi, les puces d'un ordinateur servent à la conception de nouvelles puces. L'époque où les ingénieurs comme Camenzind travaillaient en solo est révolue, mais son génie demeure dans chaque temporisateur 555 qui sort des usines de fabrication.

En 2010, alors que j'écrivais ***L'électronique en pratique***, j'ai cherché Hans Camenzind sur Internet et découvert qu'il avait un site web indiquant un numéro de téléphone.

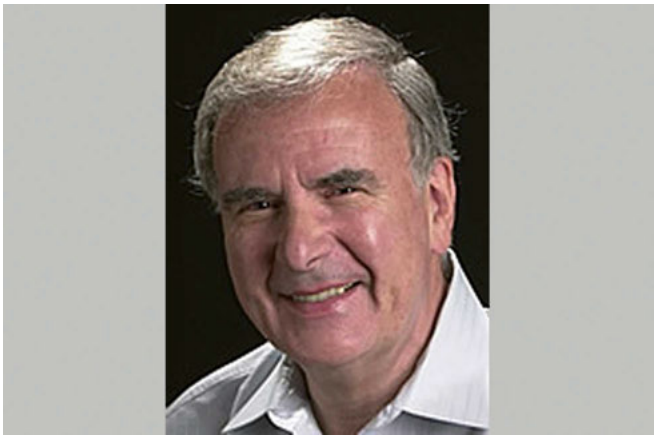


Figure 15-20. *Hans Camenzing, qui développa seul le temporisateur 555 et le vendit à Signetics.*

Spontanément, je l'ai appelé. Ce fut étrange de parler à l'homme ayant conçu le circuit intégré que j'utilise depuis plus de 30 ans. Il a été amical (bien que peu loquace) et a accepté de relire mon ouvrage. Après sa lecture, il a accordé son soutien au livre de façon encore plus amicale. Par la suite, je me suis procuré sa propre histoire de l'électronique

Much ado about almost nothing, qui est toujours disponible en ligne et que je vous recommande vivement. J'ai été honoré d'avoir eu l'opportunité de parler à l'un des pionniers de la conception des circuits intégrés. J'ai appris avec tristesse son décès en 2012. Cette édition de *L'électronique en pratique* est dédiée à sa mémoire.

Attention : tous les temporisateurs ne se valent pas

Tout ce que j'ai dit jusqu'à présent s'applique à l'ancienne version *TTL* du temporisateur 555. TTL signifie *transistor-transistor logic*. Cette technologie a précédé les versions modernes CMOS du circuit intégré, qui consomment une puissance bien plus faible. La version TTL du temporisateur est également appelée *version bipolaire*, car elle contient des transistors bipolaires.

L'avantage de la version d'origine du 555 est son très faible coût et sa robustesse. Vous aurez du mal à le détruire et sa sortie peut délivrer jusqu'à 200 mA. Le 555 n'est cependant pas efficace et il a tendance à générer des pics parasites lors du changement d'état de sa sortie. Les pics sont extrêmement brefs mais sont 50 % plus élevés que la tension d'alimentation, comme le montre la figure 15-21.

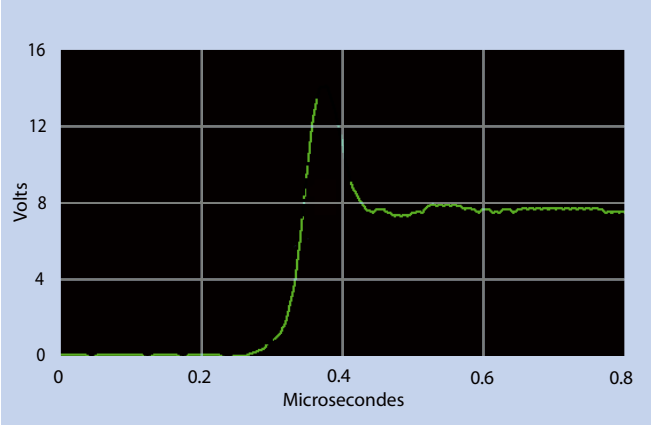


Figure 15-21. *Quand la sortie du temporisateur 555 change d'état, un pic de tension est créé.*

Une nouvelle version du 555 a été développée en utilisant des transistors CMOS, qui nécessitent moins de puissance. De plus, ce circuit intégré ne génère plus de pics parasites. En contrepartie, sa sortie est plus limitée (variable selon le fabricant de la puce). Il y a un manque de standardisation entre les diverses versions CMOS du temporisateur 555. Certaines se vantent de pouvoir fournir un courant de 100 mA, alors que d'autres sont limitées à 10 mA.

Pour ajouter à la confusion, les versions CMOS ont des identificateurs variés. Le 7555 identifie clairement une version CMOS, d'autres identifications font précéder le nombre 555 d'un groupe de lettres ou chiffres différents. De ce fait, c'est à vous d'y faire attention et de comprendre leur signification. Le LMC555CN est, par exemple, une version CMOS du temporisateur.

D'une façon générale, toute version CMOS sur le site d'un fournisseur est deux fois plus coûteuse que la version TTL, et peut accepter une tension d'alimentation inférieure à 5 V CC. Malgré tout, ces informations ne sont pas fiables. Quand vous achetez un composant se baptisant « temporisateur 555 », vous devez vérifier sa fiche technique pour vérifier s'il s'agit d'une puce CMOS et quelles sont ses spécifications. Si vous faites l'erreur et utilisez une version CMOS à la place d'une version TTL, vous ne disposerez d'une sortie ne vous fournissant qu'un dixième de courant.

Dans ce livre, afin d'éviter toute confusion et de simplifier, je n'utilise que l'ancienne version TTL du temporisateur 555, également connue sous le nom de version bipolaire. Dans les circuits contenant des puces logiques sensibles, j'ajouterai un condensateur de filtrage pour supprimer les pics de tension générés par le temporisateur.

Expérience 16
Créez un son

Maintenant que vous êtes familier avec le fonctionnement du temporisateur 555 en mode monostable et bistable, je veux que vous appreniez son fonctionnement en *mode astable*, lui permettant de se comporter comme le multivibrateur astable que vous avez réalisé dans l'expérience 11, mais de façon beaucoup plus simple, plus polyvalente et plus compacte.

Vous aurez besoin de :

- 1 plaque d'essais, des fils de liaison, une pince coupante, une pince à dénuder, un multimètre
- 1 source d'alimentation de 9 V CC (pile ou adaptateur secteur)
- 1 circuit intégré temporisateur 555
- 1 haut-parleur miniature
- résistances : 100 ohms (1), 1K (3), 10K (3), 470K (1)
- condensateurs : 0,01 µF (2), 0,47 µF (1), 10 µF (1), 100 µF (1)
- 1 diode 1N4148
- potentiomètres ajustables : 10K (2), 500K (1)

Test du mode astable

Sur la figure 16-1, le temporisateur est configuré en mode astable, afin de générer un train d'impulsions. Comparez ce circuit avec celui de la figure 15-12, où le temporisateur était câblé pour ne générer qu'une seule impulsion quand il était déclenché. Quelles différences voyez-vous ?

D'abord, le schéma n'a pas de boutons pour contrôler ses entrées, car le temporisateur n'a pas besoin de signaux de commande, il fonctionne de lui-même.

Ensuite, il utilise deux résistances de temporisation identifiées par R1 et R2. Vous verrez que toutes les documentations de référence du temporisateur 555, y compris les fiches techniques des fabricants, se réfèrent à ces résistances R1 et R2, que l'on retrouve aussi dans les formules de calcul de la fréquence du temporisateur.

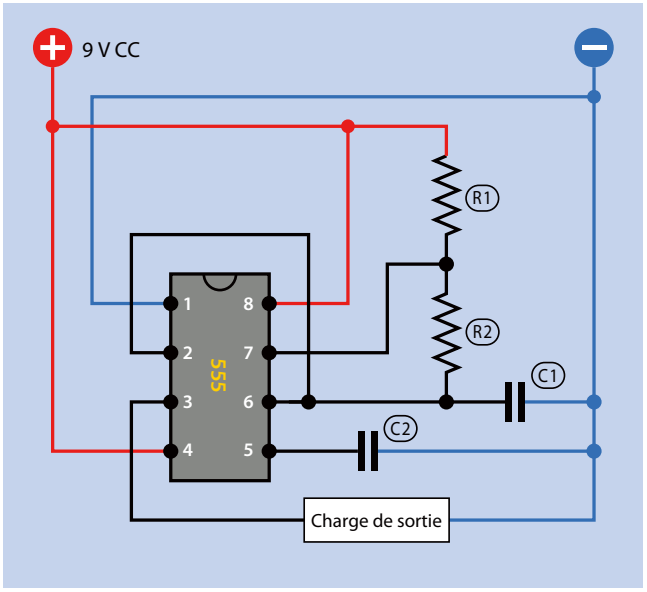


Figure 16-1. *Schéma général d'un temporisateur 555 en mode astable.*

Notez que le fil qui reliait les broches 6 et 7 dans le mode monostable n'est plus présent. Par contre, un fil a été ajouté pour relier les broches 6 et 2. En réalisant ce circuit, vous pouvez placer ce fil autour du temporisateur, ou en le chevauchant par-dessus, selon votre préférence. À votre avis, à quoi sert cette connexion qui relie la broche seuil et la gâchette ? Si vous pensez que cela permet au temporisateur de se déclencher de lui-même, vous avez raison.

Remarquez que C2 est toujours présent, prévu pour protéger la broche 5 des interférences non souhaitées.

La « charge de sortie » que j'ai reliée à la broche 3, peut-être une LED, si le temporisateur fonctionne lentement, ou un haut-parleur s'il émet un signal de fréquence audible. Le temporisateur n'a pas besoin d'un transistor externe pour piloter un haut-parleur.

Plutôt que de réaliser le circuit de base, je suggère d'ajouter un potentiomètre ajustable R2 qui vous permettra de vous

amuser en produisant une sortie sonore hurlante, ou un gémissement.

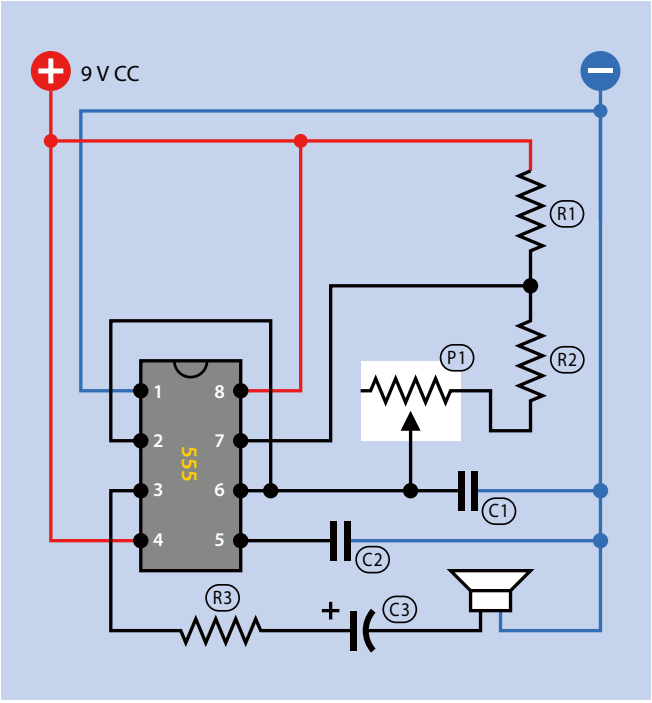


Figure 16-2. *Circuit de test du 555 en mode multivibrateur astable.*

Le schéma est représenté sur la figure 16-2, les valeurs des composants apparaissent sur le plan de la plaque de montage de la figure 16-3. Notez que j'ai dû déplacer légèrement le potentiomètre ajustable vers le haut de la plaque, pour lui trouver un emplacement. Si vous suivez les connexions et les comparez avec celles du schéma, elles sont identiques.

> *Dans ce circuit astable, comme dans le circuit monostable que vous avez réalisé précédemment, la résistance entre la broche 7 et l'alimentation positive du circuit doit être de 10K ou supérieure. Elle ne doit jamais être de valeur nulle, ce qui pourrait endommager la puce.*

J'ai prévu un condensateur C3 de 100 µF en série avec le haut-parleur. Si vous vous en souvenez, c'est un ***condensateur de couplage*** que j'ai présenté dans l'expérience 9. Les impulsions du temporisateur vont le traverser selon le principe du déplacement de courant, mais il isolera le haut-parleur de la composante continue présente à la sortie du 555. Ce n'est pas indispensable, mais permet de diminuer la consommation électrique du circuit de 50 pour cent.

Une résistance de 100 ohms est prévue pour éviter que le haut-parleur de 8 ohms ne surcharge le temporisateur.

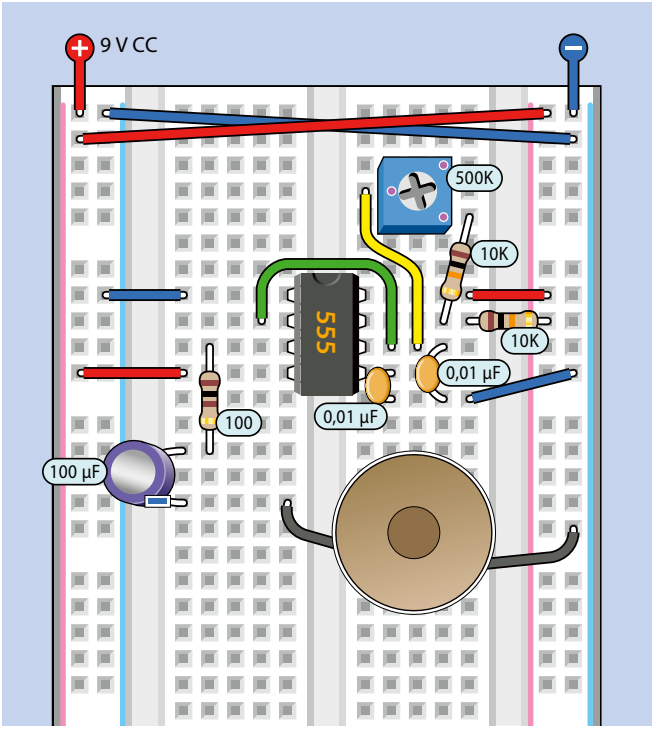


Figure 16-3. *Plan de la plaque de montage du circuit de test du multivibrateur astable.*

Assemblez le tout, vous pourrez alors constater que le potentiomètre ajustable, permet de régler la fréquence audible de sortie depuis une valeur très basse jusqu'à presque atteindre la limite de la perception sonore humaine. Voyons maintenant comment ce circuit fonctionne.

Fondamentaux : le cycle charge-décharge

La figure 16-4 est une vue rapprochée des broches importantes du temporisateur. Revenez à la figure 15-16, si vous avez besoin de vous rafraîchir la mémoire au sujet du fonctionnement interne du temporisateur.

Quand vous mettez sous tension, le comparateur interne A déplace la bascule vers la gauche, ce qui débute l'impulsion positive de la broche de sortie 3, de façon identique au fonctionnement en mode monostable. De même, le comparateur A isole la broche de décharge 7. Ainsi, cette broche ne peut pas encore décharger le condensateur qui commence à se charger par le courant qui le traversent, provenant de R1 + R2. Leurs valeurs combinées déterminent la durée de l'impulsion du temporisateur, correspondant au *cycle de charge*.

Le comparateur interne B évalue la tension du condensateur au niveau de la broche seuil, de la même façon qu'en mode monostable.

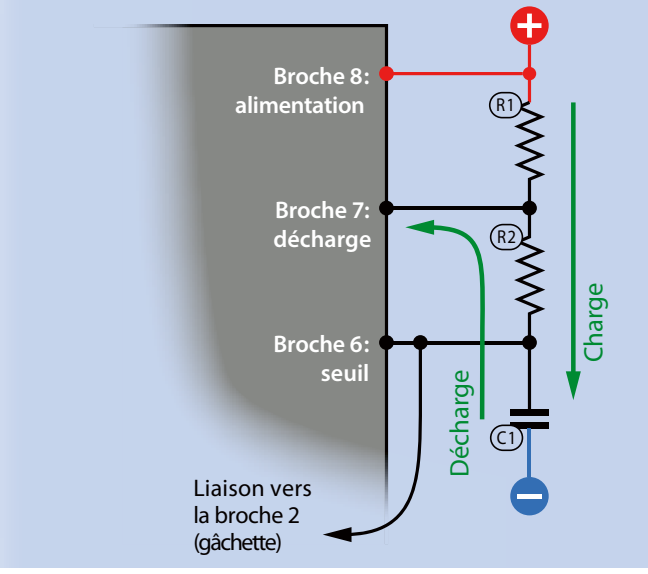


Figure 16-4. *Vue rapprochée de trois broches importantes du temporisateur.*

Quand C1 atteint les deux-tiers de la tension d'alimentation, le comparateur B actionne la bascule, ce qui met fin à l'impulsion de sortie sur la broche 3. La bascule relie la broche 7 à la masse, ce qui permet au condensateur de se décharger par cette broche, au travers de R2. La valeur de R2 détermine la longueur du *cycle de décharge*.

Comment la puce déclenche-t-elle d'elle-même le début d'une nouvelle impulsion ? Du fait que la broche 2 (gâchette), est reliée par un fil externe à la broche 6, la gâchette sait quand la tension de C1 chute au tiers de la tension d'alimentation. À ce point, la broche 2 fait comme d'habitude, elle commute la bascule vers la gauche, ce qui débute une impulsion positive sur la broche de sortie 3. La bascule isole également la broche de décharge 7. C1 peut ainsi commencer à se charger à nouveau, et le cycle se répète.

Le temporisateur est devenu auto-déclenché.

Les gens sont souvent surpris par la présence de deux résistances. Pourquoi le condensateur se charge au travers de R1 + R2, et se décharge uniquement au travers de R2 ?

	10K	22K	47K	100K	220K	470K	1M
47 µF	1	0,57	0,3	0,15	0,068	0,032	0,015
22 µF	2,2	1,2	0,63	0,31	0,15	0,069	0,033
10 µF	4,8	2,7	1,4	0,69	0,32	0,15	0,072
4,7 µF	10	5,7	3,0	1,5	0,68	0,32	0,15
2,2 µF	22	12	6,3	3,1	1,5	0,69	0,33
1,0 µF	48	27	14	6,9	3,2	1,5	0,72
0,47 µF	100	57	30	15	6,8	3,2	1,5
0,22 µF	220	120	63	31	15	6,9	3,3
0,1 µF	480	270	140	69	32	15	7,2
47 nF	1K	570	300	150	68	32	15
22 nF	2,2K	1,2K	630	310	150	69	33
10 nF	4,8K	2,7K	1,4K	690	320	150	72
4,7 nF	10K	5,7K	3K	1,5K	680	320	150
2,2 nF	22K	12K	6,3K	3,1K	1,5K	690	330
1 nF	48K	27K	14K	6,9K	3,2K	1,5K	720
470 pF	100K	57K	30K	15K	6,8K	3,2K	1,5K
220 pF	220K	120K	63K	31K	15K	6,9K	3,3K
100 pF	480K	270K	140K	69K	32K	15K	7,2K

Figure 16-5. *Table des fréquences obtenues selon les valeurs de C1 et R2, en supposant R1 égale à 10K.*

En réalité, R2 doit être présente, sinon, quand le condensateur se décharge, il viderait immédiatement toute sa charge par la broche 7 quand celle-ci est reliée à la masse, le cycle de décharge se terminerait aussitôt après avoir débuté. L'écart entre les impulsions serait alors presque nul.

D'accord, mais alors pourquoi a-t-on besoin de R1 ? Quand la broche 7 est reliée à la masse, R1 évite qu'elle soit reliée directement à la tension d'alimentation, ce qui provoquerait un court-circuit.

D'autres temporisateurs utilisant des configurations de composants différentes ont été développés, mais c'est la façon dont le 555 est constitué, il n'est pas possible de le modifier. Ces concepts doivent vous paraître plus clairs maintenant que vous l'utilisez.

Théorie : détermination de la fréquence de sortie

La table de la figure 16 5 vous aidera à déterminer les valeurs des composants à choisir pour que le temporisateur génère une fréquence donnée. Référez-vous à la figure 16-1 pour situer R1, R2 et C1. La table indique les valeurs de C1 dans la colonne de gauche, les valeurs de R2 sont au niveau de la ligne supérieure, R1 est considérée fixe, de valeur 10K.

Rappelez-vous que la table considère R1 fixe, de valeur 10K.

Les valeurs indiquées dans la table sont les fréquences exprimées en hertz et kilohertz (représentées par K afin de préserver la place). La plus élevée se situe bien au-dessus de la limite de l'oreille humaine.

Comment faire si vous souhaitez connaître la durée de chaque cycle, plutôt que la fréquence ? Rappelez-vous d'abord que la longueur d'un cycle complet correspond à la longueur de l'impulsion *plus* l'écart qui la sépare de la suivante. Pour trouver cette valeur, divisez 1 par une valeur de la table. (Il s'agit de la *valeur réciproque* de la fréquence.) Par exemple, en prenant la valeur 0,015, située en haut et à droite de la table :

```
1 / 0,015 = 66,7 secondes approximativement.
```

Si vous utilisez un condensateur de valeur supérieure à 47 µF, vous pourrez obtenir des impulsions plus longues, mais comme je l'ai dit précédemment, les fuites de tension dans les condensateurs de grandes valeurs auront une influence sur la précision du timing.

Que faire si vous souhaitez obtenir une fréquence qui ne se trouve pas dans la table ? Utilisez pour cela la formule permettant de calculer R1 et R2. Il existe plusieurs versions de cette formule, mais dans celle que je vous indique, la fréquence est en *hertz*, R1 et R2 en *kilo-ohms* et C1 en *microfarads* :

```
Fréquence = 1440 / ((R1+(2*R2)) * C1)
```

Les parenthèses indiquent l'ordre des opérations à effectuer. Commencez par doubler la valeur de R2, puis ajoutez R1, multipliez par la valeur de C1, et divisez 1 440 par le résultat.

Si vous n'aimez pas faire les calculs, ce n'est pas un problème, recherchez en ligne : «`Calcul de fréquence d'un 555`».

Vous trouverez plusieurs sites web qui proposent de faire les calculs à votre place. Entrez simplement la fréquence que vous désirez obtenir et 10000 comme valeur de R1, le site vous indiquera les valeurs possibles de R2 et C1.

Rappelez-vous que durant chaque cycle, la durée de chaque impulsion positive excède la longueur du temps qui la sépare de la suivante. Ceci provient du fait que la durée de l'impulsion positive est déterminée par le temps de charge du condensateur au travers de R1 + R2, alors que la durée du temps entre deux impulsions est déterminée par la décharge du condensateur uniquement au travers de R2. La figure 16-6 le montre.

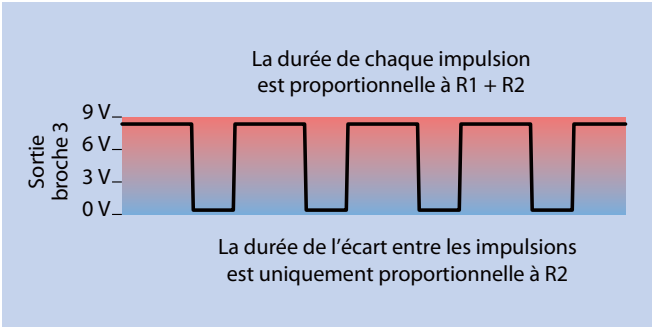


Figure 16-6. *Impulsions et écarts, quand un temporisateur 555 est câblé en mode astable.*

Comment faire si vous souhaitez des impulsions courtes et des écarts plus longs ? Je peux imaginer un tel besoin, si par exemple, vous devez actionner brièvement un relais chaque minute. Il suffit pour cela d'ajouter une diode.

Ajout d'une diode

Une diode est un composant très simple. Elle permet le passage du courant dans un sens, mais le bloque dans l'autre. Une *diode signal* permet le passage de courants jusqu'à 200 mA, alors que les *diodes de redressement* peuvent supporter des intensités plus importantes. Pour beaucoup d'applications de ce livre, la petite diode signal de base, 1N4148 convient.

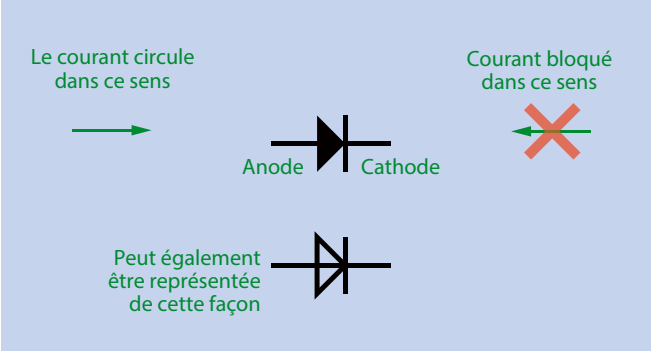


Figure 16-7. *N'importe lequel de ces symboles peut être utilisé pour représenter une diode, dans les schémas.*

Les deux extrémités d'une diode sont appelées *anode* et *cathode*. Selon le sens conventionnel, le courant circule de l'anode vers la cathode qui est repérée par une bande gris argent ou noire. Voir la figure 15-7.

La figure 16-7 montre les symboles de schématique d'une diode. La grande flèche indique le sens de passage du courant selon le sens conventionnel. Du fait qu'une diode signal n'émet pas de lumière, la paire de petites flèches du symbole des LED n'est pas présente. Le symbole d'une LED est souvent entouré par un cercle, ce n'est pas le cas pour une diode. Je ne sais pas pourquoi, mais puisque tout le monde omet le cercle, j'en ferai autant.

Comment utiliser la diode dans le circuit du temporisateur 555 en mode astable, pour obtenir des impulsions plus courtes que l'écart qui les sépare ?

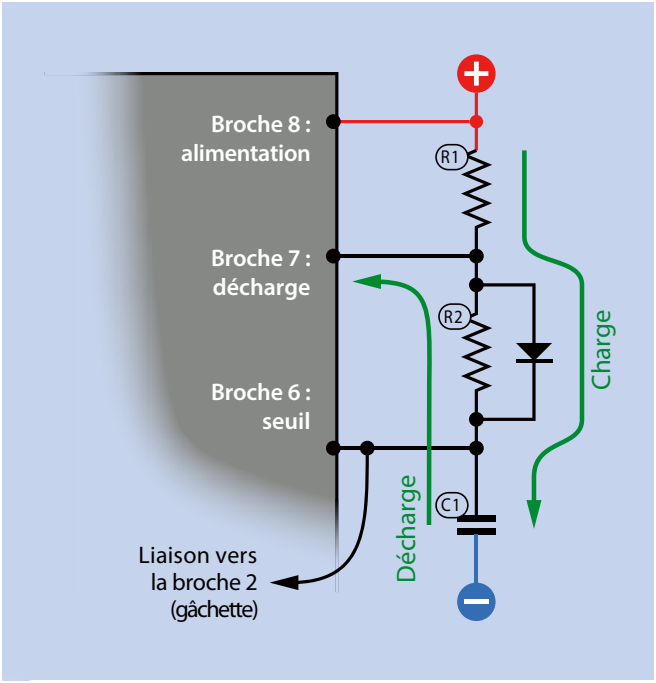


Figure 16-8. *Ajout d'une diode pour contourner la résistance R2.*

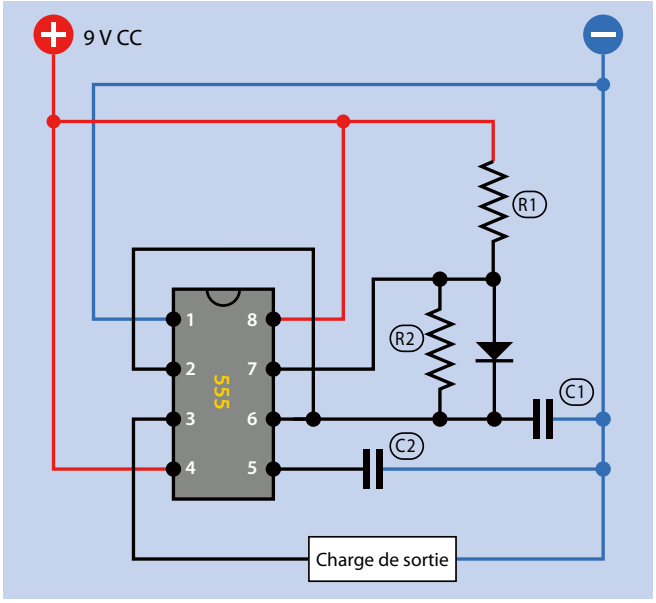


Figure 16-9. *Dans cette version complète de la figure 16-8, la diode évite le potentiomètre ajustable et la résistance de 10K.*

La figure 16-8 montre le principe. Quand le condensateur se charge, la plus importante partie du courant évite R2 et passe par la diode, ainsi R1 détermine la durée de la charge, au lieu de R1 + R2. Quand le condensateur se décharge, la diode bloque le courant qui passe uniquement par R2 qui détermine la durée de la décharge.

Sur la figure 16-9, j'ai redessiné le schéma (qui était à l'origine sur la figure 16-1) en ajoutant la diode. Vous pouvez la voir au milieu, près de R2. Vous pouvez comparer ce schéma et le plan de la plaque de montage de la figure 16-10 qui ressemble à celui de la figure 16-3, à l'exception du fil de pontage vert qui a été déplacé ainsi que le potentiomètre ajustable afin de gagner de la place.

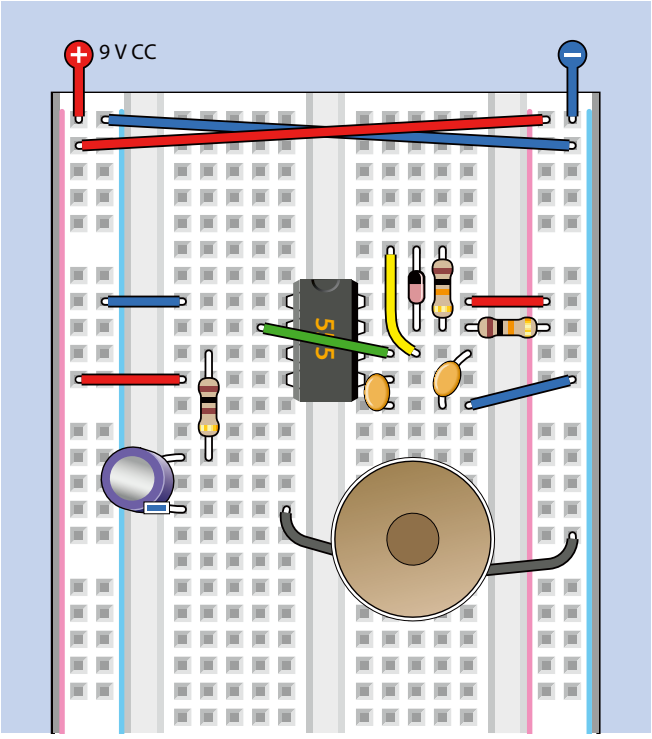


Figure 16-10. *Ajout d'une diode à la plaque de montage.*

R1 détermine maintenant la charge de C1, alors que R2 en contrôle la décharge. Vous pouvez ajuster la durée de l'impulsion avec R1, et l'écart entre les impulsions, plus ou moins par R2.

Mais attendez, que signifie « plus ou moins » ? Vous avez remarqué que la plus grande partie du courant évite R2 en passant par la diode. Vous avez appris lors de votre découverte de la LED que les diodes ont une résistance effective. Nous ne la connaissons pas précisément, car elle varie selon la tension, mais nous savons qu'une certaine résistance sera présente à cet endroit. En conséquence, sur la figure 16-8, presque la totalité du courant traversera la diode, mais une partie de ce courant continuera à s'écouler dans R2, même si c'est infime. L'intensité exacte dépendra de la valeur de R2 et de la tension d'alimentation.

Une des qualités fantastiques du temporisateur 555 est sa précision inchangée, que vous utilisiez une tension d'alimentation de 16 V CC ou de 5 V CC. Par contre, si vous ajoutez la diode de contournement, la formule de calcul de la fréquence ne sera plus valable et vous ne pourrez plus rechercher une valeur dans la table de la figure 16-5. Vous devrez alors procéder par tâtonnement pour aboutir au résultat souhaité.

La broche de contrôle

J'ai ignoré la broche de contrôle, car elle n'est pas très souvent utilisée. Dans certaines circonstances cependant, elle peut présenter un intérêt important. Quand vous appliquez une tension sur la broche 5 d'un temporisateur, fonctionnant en mode astable, cette tension ajustera la fréquence en plus ou en moins. Cela ouvre une possibilité intéressante. Si vous disposez de deux temporisateurs, et que vous reliez la sortie du second à la broche de contrôle du premier, vous pourrez moduler la fréquence du premier temporisateur par celle du second.

Cela devrait vous rappeler, que dans l'expérience 11, j'ai relié deux multivibrateurs astables. La différence tient au fait que le temporisateur 555 permet des réglages beaucoup plus étendus et d'obtenir des résultats contrôlables avec plus de précision.

Pour commencer, il vous faut comprendre le fonctionnement de la broche de contrôle avec un seul temporisateur. Sur la figure 16-11, en bas du schéma, les résistances R4 et R5 font chacune 1K, et P2 fait 10K. Le curseur du potentiomètre ajustable est relié à la broche de contrôle du temporisateur, alors que C2 qui était relié à la broche 5 est supprimé. Vérifiez les différences avec la figure 16-2.

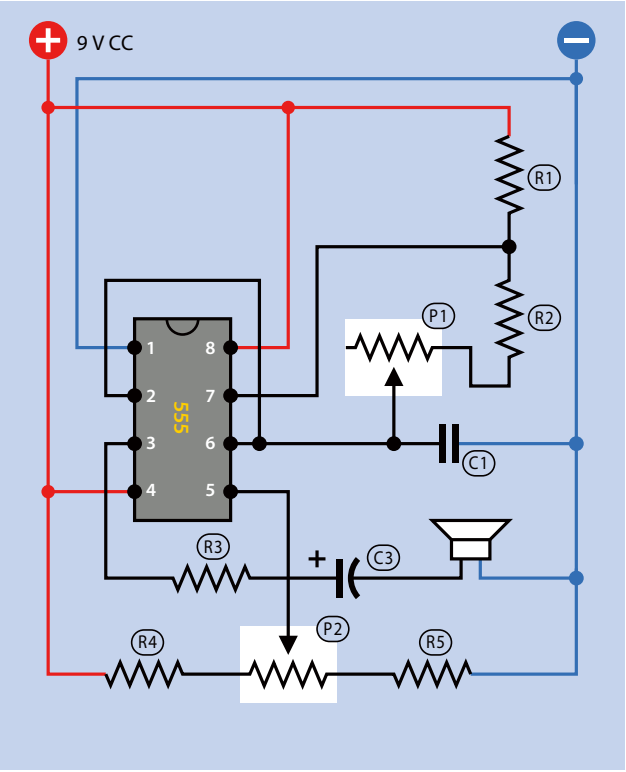


Figure 16-11. *Deux résistances et un potentiomètre ajustable ont été ajoutés en bas du schéma, pour pouvoir appliquer une tension variable à la broche de contrôle du timer 555.*

La figure 16-12 représente le plan de la plaque de montage du circuit. J'aimerais que vous la réalisiez, car je la ferai évoluer vers une expérience complète mettant en jeu des possibilités de synthétisation que vous trouverez intéressantes. Si vous avez déjà réalisé le circuit de la figure 16-3, vous pouvez le compléter avec les nouveaux composants en bas du schéma, et éliminer C2 qui était relié à la broche 5 du temporisateur.

Voici quelques informations concernant la broche de contrôle :

> *La tension de contrôle de la broche 2 doit être comprise entre approximativement 20 % et 90 % de la tension d'alimentation. En dehors de ces limites, le temporisateur cessera de s'auto-déclencher et restera muet en représailles (néanmoins, il ne sera pas endommagé).*

Mais comment savoir si les composants que j'ai ajoutés vont délivrer une tension variant comme je le souhaite ? Pour cela, j'ai fait un calcul simple, basé sur ma connaissance des *diviseurs de tension* qui sont fondamentaux en électronique. Je vais faire une digression et traiter ce sujet maintenant.

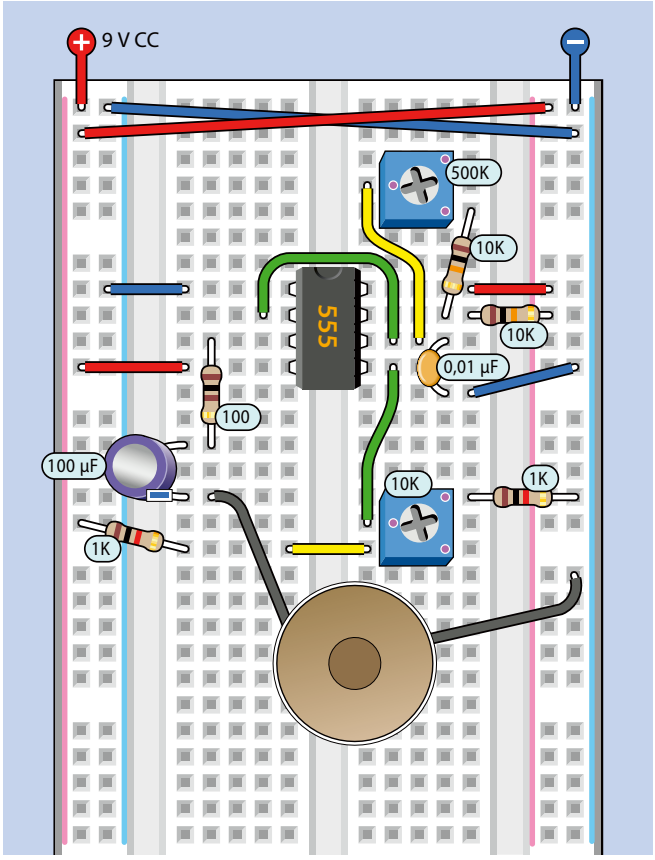


Figure 16-12. *Plan de la plaque de montage du circuit de la figure 16-11.*

Fondamentaux : les diviseurs de tension

Si vous observez la figure 15-16 qui montrait le fonctionnement interne du temporisateur, vous avez vu les mots « diviseur de tension » en haut du dessin, au-dessus des trois résistances de 5K reliées en série. Je n'ai pas donné d'explication à ce sujet, car je ne voulais pas interrompre mes autres explications, mais quand vous avez trois résistances

égales reliées en série entre l'alimentation positive et la masse négative, la loi d'Ohm dit que chacune d'entre elles créera une chute de tension identique, comme le montre la figure 16-13. On pourrait utiliser n'importe quelle valeur de résistance, pas uniquement 5K, le résultat serait identique tant que les valeurs des résistances sont égales.

Supposons maintenant que je relie deux résistances de 5K en série, pour faire une résistance de 10K, comme sur la deuxième partie de la figure 16-13. Une résistance de 10K est équivalente à deux résistances de 5K en série, n'est-ce pas ? Ainsi, on obtiendrait toujours une tension de 3 V comme c'est indiqué.

Et en inversant les résistances, comme dans la troisième partie de la figure 16-13, on obtiendrait une tension de 6 V.

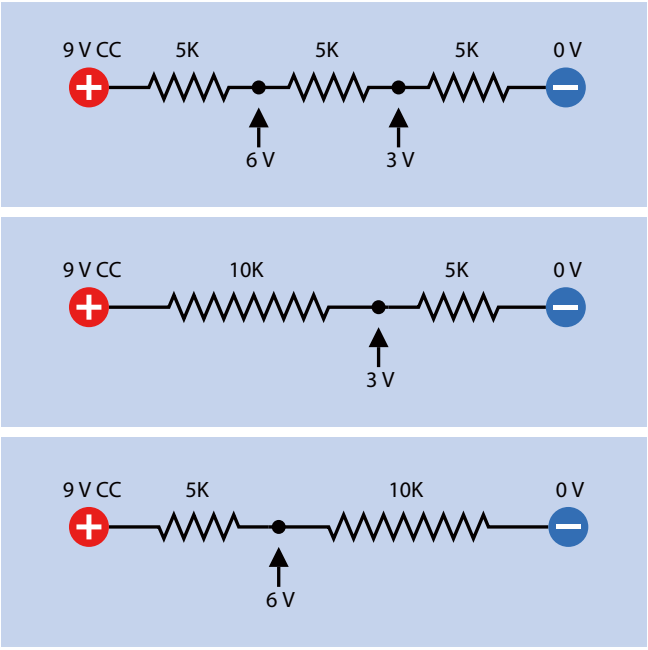


Figure 16-13. *Concept de base d'un diviseur de tension.*

Il me semble que je pourrai calculer la tension à la jonction des deux résistances en utilisant une formule ; c'est effectivement possible. La figure 16-14 montre comment faire, en utilisant deux résistances reliées entre le positif de l'alimentation et la masse. J'ai appelé les résistances RA et RB au lieu de R1 et R2, références que j'ai déjà utilisées pour les résistances du temporisateur 555. Vcc est la tension d'alimentation et V la tension entre les résistances.

La formule est la suivante :

```
V = Vcc * ( RB / ( RA + RB ) )
```

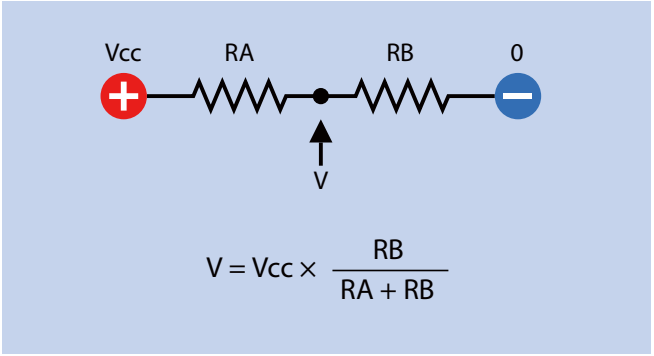


Figure 16-14. *Formule de calcul de la tension d'un diviseur de tension.*

Je vais maintenant vous montrer comment cela peut être appliqué au circuit du 555. La figure 16-15 montre les deux résistances de 1K, et le potentiomètre ajustable de 10K utilisés pour générer la tension de contrôle, dans la moitié haute de la figure, j'ai réglé le potentiomètre de sorte que son curseur soit totalement à gauche de sa piste résistive. Le calcul indiqué montre que la tension au niveau du curseur est maintenant de

```
9 * (11 / 12)
```

soit 8,25 V selon ma calculatrice. La moitié inférieure de la figure montre le cas où le curseur du potentiomètre ajustable est situé à l'autre extrémité de sa piste, sa tension est alors

```
9 * (11 / 12)
```

soit environ 0,75 V.

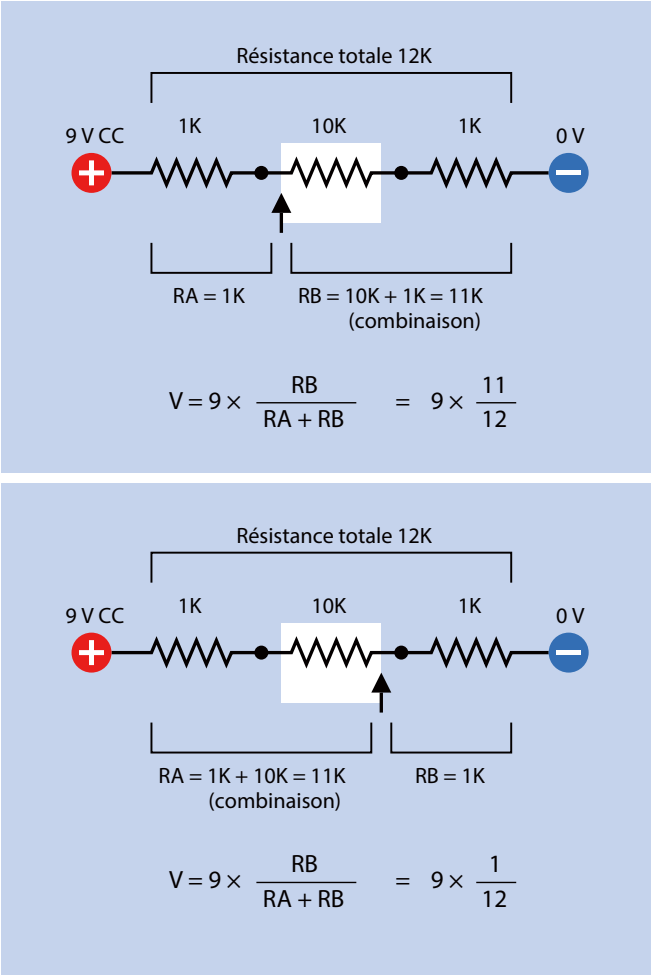


Figure 16-15. *Utilisation de la formule pour calculer la tension d'un diviseur de tension relié à la broche de contrôle d'un temporisateur 555.*

La valeur minimale est un peu trop faible, mais en réalité, en reliant le diviseur de tension à la broche de contrôle, la tension de cette broche affecte le pont diviseur et augmente légèrement. Comme toujours en électronique, tout a tendance à perturber le reste.

Voici quelques messages à conserver au sujet des diviseurs de tension :

- La formule donne un résultat correct tant que le point intermédiaire du diviseur de tension n'est pas relié à d'autres composants qui peuvent l'influencer.
- Quand on relie un composant au point intermédiaire entre deux résistances, la résistance de ce composant par rapport à la masse devra être la plus élevée possible, comparativement aux valeurs des résistances du diviseur de tension.

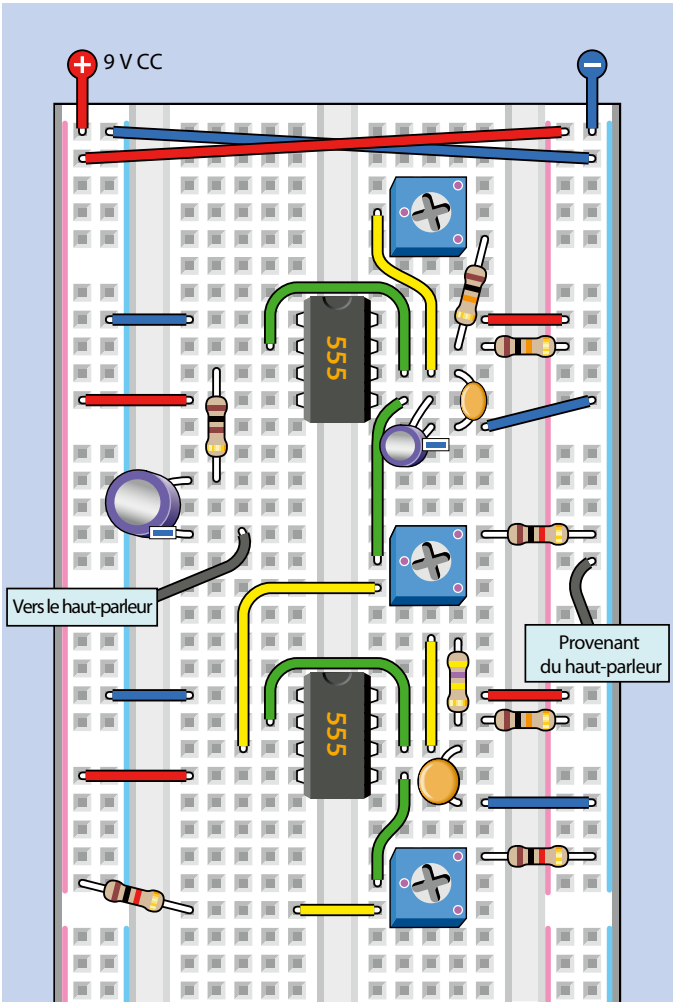
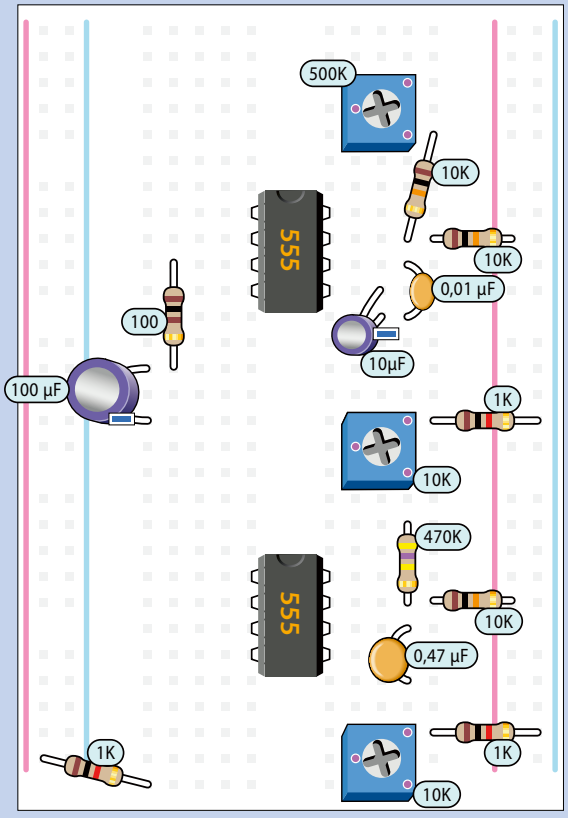


Figure 16-16. *Plan final de la plaque de montage du circuit utilisant deux 555.*



Composants

Résistances	Condensateurs	Potentiomètres ajustables
100 (1)	0,01 µF (1)	10K (2)
1K (3)	0,47 µF (1)	500K (1)
10K (3)	10 µF (1)	
470K (1)	100 µF (1)	Temporisateurs 555 (2)
		Haut-parleur de 8 ohms (1)

Figure 16-17. *Plan représentant la position des composants du circuit à double 555.*

C'est une autre façon de dire que les valeurs des résistances d'un diviseur de tension doivent être relativement faibles, mais si vous les choisissez trop faibles, elles gaspilleront de l'énergie car elles doivent être reliées entre les deux pôles de l'alimentation. Le choix idéal est donc un compromis. Pour mon circuit temporisateur, j'ai considéré que deux résistances de 1K et un potentiomètre ajustable de 10K étaient suffisamment faibles, comme je le souhaitais.

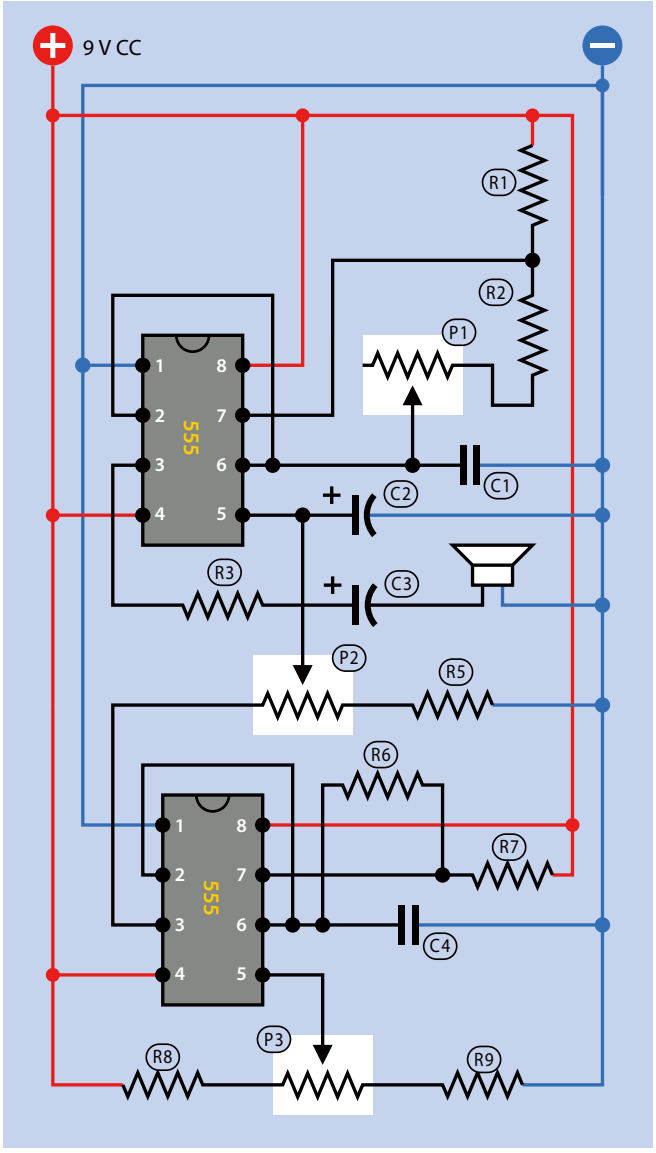


Figure 16-18. *Schéma du circuit à double 555.*

Contrôle d'une puce par une autre

Je reviens maintenant au scénario que j'ai évoqué précédemment : la sortie du second temporisateur reliée à la broche de contrôle du premier temporisateur.

Le circuit astable de la figure 16-12 devrait fonctionner n'est-ce pas ? Vous allez maintenant ajouter un nouveau circuit vers le bas de la plaque de montage, pour le contrôler. Le plan de la figure 16-17 ne contient que les composants, ainsi, vous pouvez voir ce dont vous avez besoin. Le schéma du circuit est représenté sur la figure 16-18, si vous le comparez à celui de la figure 16-11, vous verrez qu'il y a seulement deux différences : C2 est réapparu, mais c'est maintenant un condensateur électrochimique de valeur 10 µF, je vais expliquer pourquoi. Par contre, R4 a été supprimée, car la connexion à gauche de P2 est maintenant reliée directement à la sortie, broche 3 du temporisateur additionnel, et la tension de cette sortie n'excédera jamais 8 V.

Sur le plan de la plaque de montage, le haut-parleur n'apparaît plus car il n'y avait pas assez de place pour lui, mais vous trouverez les fils qui vous permettront de le relier.

Le circuit est contenu dans la moitié haute de la plaque, il n'est donc plus nécessaire de prévoir des fils de pontage pour relier le bus supérieur avec celui de la moitié inférieure de la plaque, même si votre plaque possède des bus séparés.

En mettant le circuit sous tension, retirez, puis réinsérez le condensateur C2. Cela devrait générer un son vacillant, car il filtre le signal de la broche de contrôle du premier temporisateur. Vous pouvez expérimenter l'utilisation de condensateurs de différentes valeurs.

P2 détermine le niveau de modulation de la broche de contrôle du temporisateur 1, R6 et R7 sont les résistances de temporisation du temporisateur 2, C4 est le condensateur de temporisation. J'ai choisi leurs valeurs pour générer un signal d'environ trois battements par seconde, mais on peut le régler avec le nouveau diviseur de tension, constitué par R8 et R9 en série avec P3, que j'ai ajouté en bas du circuit. Les deux résistances ont une valeur de 1K et P3 fait 10K, comme dans le diviseur que vous avez précédemment réalisé.

Je pense que vous aurez plaisir à manipuler ce circuit. P1 contrôle toujours la hauteur du son créé par le temporisateur 1. P3 contrôle la vitesse de la modulation générée par IC2, P2 détermine la profondeur de la modulation. Si vous réduisez la valeur de P2, vous obtiendrez un effet de vibrato comparable à celui d'un chanteur d'opéra. Si vous augmentez sa valeur, le son ressemblera davantage à une sirène d'alarme de voiture.

Avouez qu'il est fantastique de pouvoir trouver un chanteur d'opéra et une sirène d'alarme dans le même circuit !

Encore une idée. Vous pourriez enregistrer le son de ce circuit que vous préférez, et l'utiliser comme sonnerie de votre téléphone. Le seul problème que j'entrevois est la réaction de vos proches qui pourraient trouver cette sonnerie moins intéressante que vous. Préparez-vous à des remarques du style « Arrête ce son horrible ! »

Existe-t-il des modifications envisageables ?

Bien évidemment ! Des modifications supplémentaires sont toujours possibles.

Que pensez-vous qu'il se passerait si vous ajoutiez un troisième temporisateur dont la sortie serait reliée à la broche de contrôle du second temporisateur ? Retirez R8 et reliez la sortie du troisième temporisateur au fil de pontage jaune qui est relié à P3 en bas de la plaque de montage. Il serait intéressant d'essayer avec un troisième temporisateur dont la sortie varierait très lentement, il en résulterait un effet comparable à une sirène dont le son augmente puis diminue, comme celui d'une alarme de voiture. Deux sonorités très irritantes réunies !

Et si vous souhaitiez un effet de trémolo plutôt qu'un vibrato ? Un trémolo module l'intensité d'un son, alors que le vibrato module sa fréquence. Le son produit par ce circuit dépend de la tension d'alimentation, vous pourriez ainsi ajuster la tension d'alimentation du temporisateur 1. Pour cela, déconnectez son alimentation en supprimant le fil de pontage en haut et à droite, et alimentez-le avec la sortie modulée du second temporisateur. Utilisez un fil de pontage assez long pour relier la broche 3 du temporisateur 2 à la broche 8 du temporisateur 1, c'est tout ce qu'il faut faire. Je l'ai essayé et ça fonctionne, mais la transition est un peu brutale. Un condensateur de filtrage de valeur un peu plus élevée pourrait y remédier, ou peut-être une résistance de tirage placée sur la broche 8 du temporisateur 1. Essayez par vous-même pour en juger.

Tant que vous n'alimentez pas les temporisateurs de façon incorrecte, je ne pense pas que vous puissiez les endommager. Et vous ne risquez pas davantage d'endommager votre haut-parleur en maintenant R3 et C3 en série avec lui, ils sont là pour le protéger des sonorités que vous lui fournissez.

Les circuits audio-phoniques sont toujours amusants à manipuler, mais dans l'expérience suivante, nous aurons un objectif plus sérieux : la création du système d'alarme dont je vous ai déjà parlé. Vous avez maintenant acquis toutes les connaissances nécessaires pour le réaliser.

Expérience 17
Une idée alarmante

Un système d'alarme anti-intrusion qui émet un son strident dans votre habitation ne sera pas assez puissant pour alerter vos voisins, mais il peut être utile pour vous réveiller si vous êtes endormi. Si d'autres personnes sont présentes dans votre logement, elles apprécieront une alarme qui les prévient quand une porte ou une fenêtre est ouverte. Dans tous les cas, c'est un projet idéal pour mettre en pratique les connaissances et votre habileté, acquises jusqu'à présent.

Vous aurez besoin de :

- 1 plaque d'essais, des fils de liaison, une pince coupante, une pince à dénuder, un multimètre
- 1 adaptateur secteur de 9 V CC. Si vous utilisez intensément ce circuit, il utilisera trop de courant pour une pile de 9 V
- résistances : 100 ohms (1), 470 ohms (4), 10K (5), 47K (4), 470K (2)
- condensateurs : 0,01 µF (2), 0,47 µF (2), 10 µF (3), 100 µF (2)
- 3 circuits intégrés temporisateurs 555
- 1 interrupteur tactile
- 1 diode signal 1N4148
- 1 interrupteur SPST ou SPDT à glissière pouvant s'insérer dans la plaque de montage
- 4 LED génériques rouges

Préparation

J'ai souvent reçu des e-mails de lecteurs me demandant comment concevoir des circuits. Je n'ai jamais été formé sur ce sujet, je n'ai donc pas une réponse faisant autorité en la matière, mais je peux vous dire quelle a été mon approche

pour ce projet, et comment je l'ai rendu opérationnel, après avoir compris que j'avais commis des erreurs, alors que j'étais à mi-chemin de sa réalisation.

La première nécessité pour concevoir un circuit est d'avoir de l'imagination. Vous devez pouvoir imaginer comment vous allez l'utiliser, comment vous voulez le réaliser, car si vous réunissez des composants sans y avoir réfléchi, vous vous apercevrez rapidement que quelque chose d'important vous a probablement échappé.

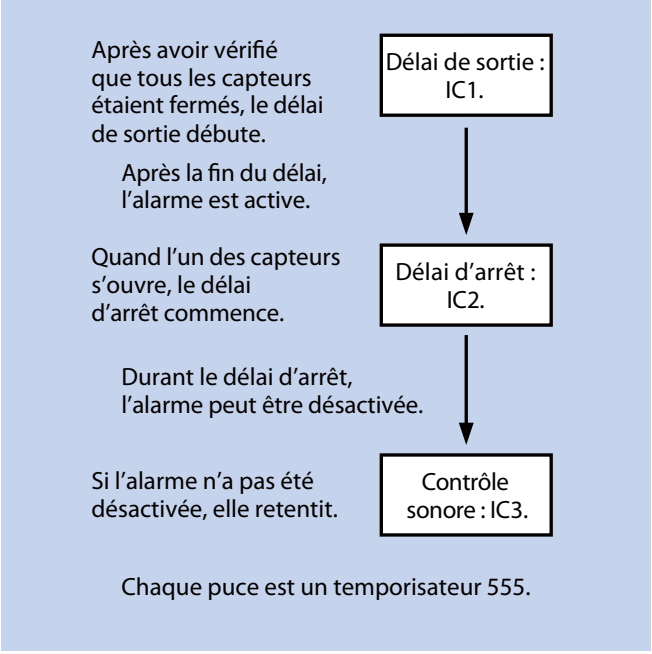


Figure 17-1. *Première approche des fonctions que l'alarme doit réaliser.*

Ayant ceci en tête, j'ai élaboré un premier plan, résumé sur la figure 17-1. Les temporisateurs sont identifiés IC1, IC2, et IC3, car c'est ainsi que les circuits intégrés sont fréquemment identifiés dans les schémas. Voici le détail des étapes :

1. Vous allumez l'alarme. Une LED vous confirme que toutes les portes et fenêtres sont fermées.

2. Si vous envisagez de quitter les lieux, appuyez sur un bouton pour commencer le délai de 30 secondes pendant lequel vous pouvez ouvrir une porte sans déclencher l'alarme. Il s'agit du délai de sortie.

3. À la fin du délai de sortie, l'alarme est automatiquement activée.

4. Si maintenant une porte ou une fenêtre est ouverte, un autre délai débute, il s'agit du délai d'arrêt. Durant cette période, si vous pénétrez par une porte, vous pouvez désarmer l'alarme sans la déclencher.

5. Si vous n'arrêtez pas l'alarme, avant la fin du délai d'arrêt, celle-ci retentit.

J'ai pensé que cette séquence était réaliste, la prochaine étape consistait à choisir les composants. Dans la seconde édition de *L'électronique en pratique*, je proposais un circuit d'alarme utilisant des transistors et un relais, mais ayant eu depuis, quelques années pour réfléchir à mes choix, je décidais qu'il était possible de simplifier le projet en utilisant seulement trois temporisateurs 555.

Technique : les capteurs magnétiques

Avant de continuer, je vais faire une pause pour vous expliquer le fonctionnement d'un système d'alarme. Il faut d'abord équiper chaque issue d'un capteur constitué de deux parties, comme le montre la figure 17-2. L'un des modules contient un aimant, l'autre un *interrupteur à lames souples (reed switch)*.

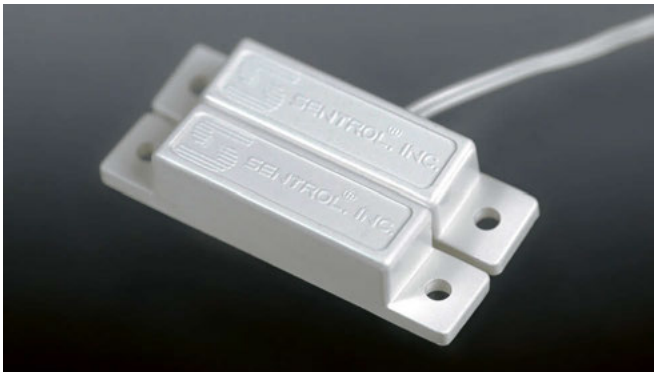


Figure 17-2. *Les deux modules d'un capteur d'alarme.*

L'interrupteur est constitué de deux lamelles souples formant les contacts, enfermées dans un tube de verre scellé. Les contacts sont aimantés de sorte qu'ils s'attirent (dans le cas d'un contact normalement ouvert), ou se repoussent (dans le cas d'un interrupteur normalement

fermé). La figure 17-3 représente un interrupteur à lames souples, la figure 17-4 montre le fonctionnement du capteur. (Les lettres N et S signifient Nord et Sud, les deux pôles d'un aimant.)

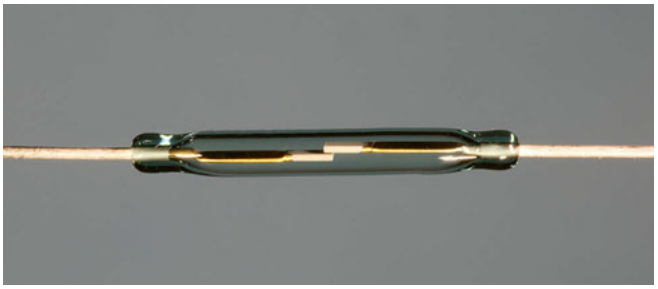


Figure 17-3. *Interrupteur à lames souples. L'enveloppe de verre a un diamètre d'environ 2 mm.*

Notez que si vous achetez des capteurs pour réaliser votre système d'alarme, vous devrez choisir le type dont les contacts sont normalement ouverts, et non celui dont les contacts sont fermés au repos. Vous installez chaque module magnétique sur une fenêtre ou une porte, et chaque module interrupteur sur le bâti de l'ouverture, disposés face à face afin qu'ils soient presque en contact quand la fenêtre ou la porte est fermée.

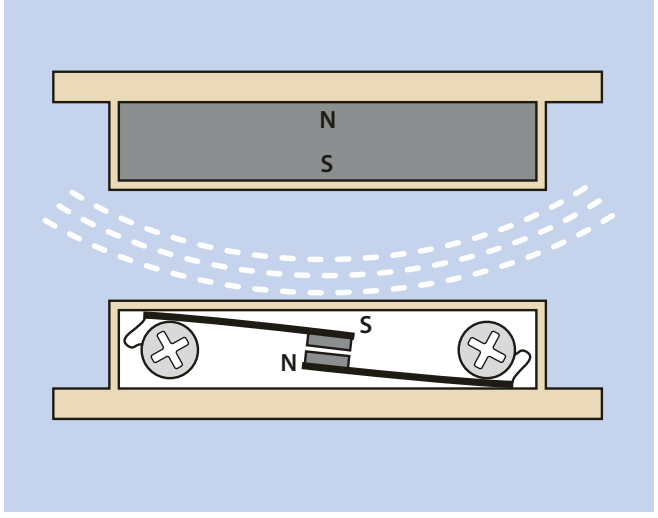


Figure 17-4. *Quand un module magnétique s'approche de l'interrupteur à lames souples, son champ magnétique provoque le déplacement des contacts.*

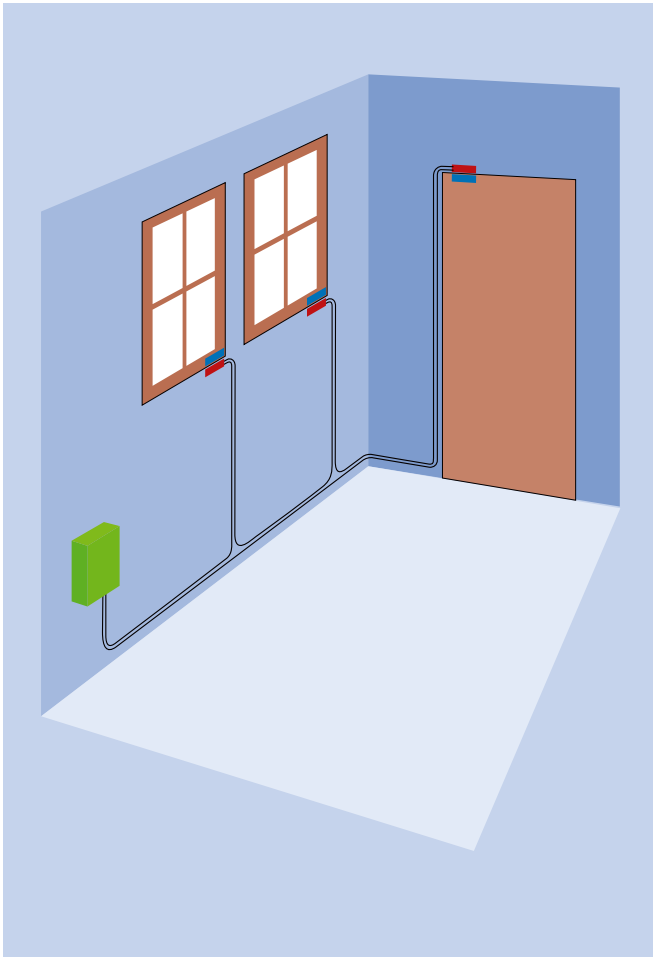


Figure 17-5. *Capteurs d'alarme reliés en série. En bleu les modules magnétiques, en rouge les interrupteurs à lames souples.*

Sur la figure 17-5, les rectangles bleus sont les modules magnétiques, les interrupteurs sont en rouge, et l'alarme est dans la boîte verte. Les interrupteurs étant reliés en série, si l'un d'entre eux s'ouvre, la continuité du circuit est interrompue.

C'est un circuit à boucle de détection par ouverture, qui se déclenche si l'un des capteurs ouvre ses contacts ou si une tentative de vandalisme venait à rompre la boucle.

J'ai commencé par étudier la façon dont le système devait s'interfacer avec IC2 qui contrôle la phase intermédiaire de la séquence de la figure 17-1. Si je n'arrive pas à trouver

comment déclencher un temporisateur à partir des capteurs d'alarme, mon projet n'ira pas loin.

Rendons les temporisateurs heureux

J'ai l'habitude d'imaginer que les composants sont des créatures vivantes. Mon devoir est de les rendre heureux en leur fournissant ce qu'ils aiment, ils durent ainsi plus longtemps et se comportent correctement.

En ce qui concerne le temporisateur 555, il a besoin d'une tension clairement définie sur sa gâchette. Comme vous le savez, depuis l'expérience 15, si la tension de la broche 2 devient inférieure au tiers de la tension d'alimentation, la sortie du temporisateur devient haute. Si la tension reste supérieure au tiers de la tension d'alimentation, la sortie du temporisateur est au niveau bas et il reste ainsi en attente. Mais si aucune tension définie n'est appliquée à la gâchette, le temporisateur se comporte de façon imprévisible. Il ne sera pas content, et s'il n'est pas content, je ne le suis pas non plus.

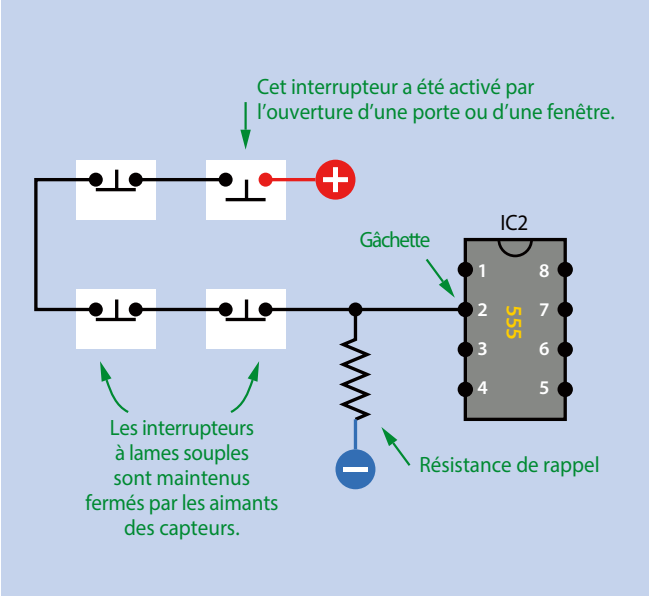


Figure 17-6. *Concept de base du circuit de détection d'un système d'alarme.*

Gardant ceci en mémoire, j'ai alors décidé d'appliquer une tension positive à l'une des extrémités de la boucle des capteurs d'alarme selon la figure 17-6. Ainsi, tant que les capteurs sont fermés, la gâchette reçoit une tension relativement haute, et le temporisateur reste satisfait, ne faisant rien.

Si l'un des interrupteurs est ouvert, la connexion positive est interrompue. En ce cas, une résistance de rappel prend le dessus et déclenche le temporisateur. Quand le temporisateur est déclenché, sa sortie devient haute, ce que je pense pouvoir utiliser d'une façon ou d'une autre, mais je ne sais pas encore comment.

En fait, vous avez déjà rencontré une configuration similaire sur la figure 15-12. Mais dans ce cas, il s'agissait d'une résistance de tirage au lieu d'une résistance de rappel, et le bouton-poussoir était relié à la masse.

Ensuite, j'ai réfléchi au sujet de IC1. Il doit créer une pause de 30 secondes déterminant le délai de sortie. La sortie haute de IC1 doit empêcher le déclenchement d'IC2 lorsqu'un capteur s'ouvre durant le délai de sortie.

La figure 17-7 montre la façon très simple d'y parvenir. Pour commencer, lorsque vous êtes prêt, appuyez sur le bouton de mise en marche. IC1 génère alors une impulsion positive unique, car il sera configuré en mode monostable.

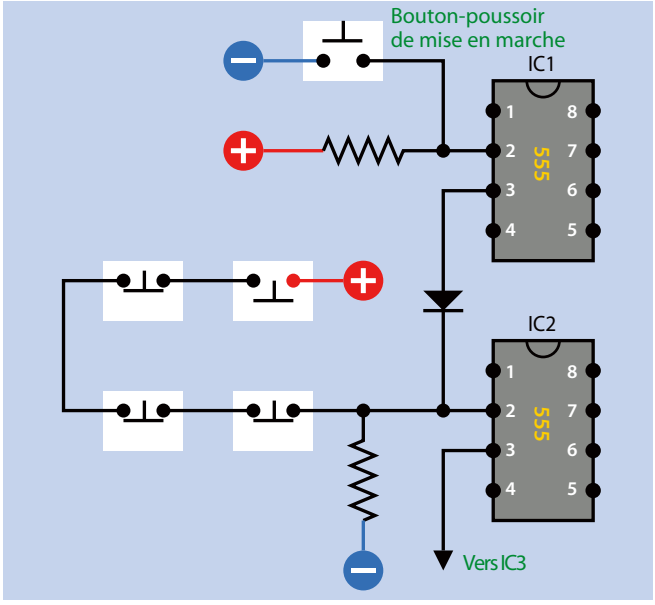


Figure 17-7. *Ajout de IC1 pour procurer un délai de grâce de 30 secondes.*

Supposons que la sortie de IC1 reste haute pendant 30 secondes. Elle passe au travers d'une diode, afin de contrarier l'effet de la résistance de rappel et forcer le niveau de la gâchette à rester haut, même si quelqu'un ouvre l'interrupteur d'un capteur.

Il faut voir la diode et la résistance de rappel comme un diviseur de tension. La diode possède une résistance effective très petite comparée à celle de la résistance de rappel qui est de 10K. Ainsi, la tension de la gâchette sera proche de celle de la sortie de IC1 qui est d'environ 8 V. C'est plus qu'il n'en faut pour empêcher la résistance de rappel de déclencher la gâchette de IC2.

Pourquoi ai-je utilisé une diode ? Quand IC1 a terminé la génération du délai de sortie, sa broche de sortie est au niveau bas, et je ne veux pas transmettre ce niveau à IC2, je l'ai donc bloqué par la diode.

Résumons ma progression à ce point :

- J'appuie sur un bouton pour déclencher IC1 qui génère une sortie haute pendant 30 secondes.
- J'ouvre la porte pour sortir de la maison, puis la referme, mais IC2 ne le détecte pas, car la tension provenant d'IC1 l'empêche d'être déclenché.
- Lorsque le délai de sortie est écoulé, la sortie d'IC1 redevient basse, il n'a plus d'effet sur IC2, l'alarme réagit alors en cas d'ouverture d'un des interrupteurs.
- Je reviens chez moi et ouvre la porte ce qui déclenche IC2 qui est configuré en mode monostable, il va rendre sa sortie haute, pendant 30 secondes. Je ne sais pas encore quoi faire de cela, mais durant le délai d'arrêt, vous pouvez arrêter l'alarme. Si vous ne le faites pas, l'impulsion haute générée par IC2 cessera au bout de 30 secondes et déclenchera IC3 par un moyen à déterminer.

Tout cela paraît assez simple. Peut-être un peu trop simpliste. Voyez-vous le gros défaut de ce scénario ? Je ne l'avais pas vu avant de réfléchir davantage.

Voici le problème. Après le délai de sortie, l'alarme est activée et peut détecter les intrusions. Supposons que quelqu'un entre par une porte ou une fenêtre, et la ***laisse ouverte***. L'interrupteur du capteur déclenche IC2, ce qui initialise le délai d'entrée. Vous vous rappelez, sans doute, que quand l'entrée d'un temporisateur 555 est maintenue au niveau bas, sa sortie reste indéfiniment au niveau haut. En conséquence, si l'intrus laisse une issue ouverte, la broche 2 d'entrée du temporisateur sera maintenue au niveau bas ce qui redéclenchera IC2 dont la sortie restera au niveau haut. Le délai d'entrée ne cessera jamais, et IC2 n'indiquera jamais à IC3 de faire retentir l'alarme.

Oops !

Il ne me restait plus qu'à repenser l'ensemble, j'ai alors compris mon erreur : j'avais oublié de rendre IC2 heureux. Le temporisateur 555 ne doit jamais rester en situation d'être déclenché indéfiniment par une entrée maintenue au niveau bas. Le temporisateur est conçu pour recevoir une ***courte*** impulsion de déclenchement.

En réalité, IC2 devrait être reliée à une résistance de tirage (vers le pôle positif de l'alimentation) et non une résistance de rappel vers la masse. Le maintien de sa gâchette au niveau haut est ce qu'un temporisateur apprécie. Il peut alors être synchronisé par une brève impulsion vers le niveau bas, avant que sa broche d'entrée ne retourne au niveau haut.

Comment vais-je y parvenir ? La figure 17-8 montre le problème.

Quand j'ai besoin d'une brève impulsion, je pense immédiatement à un condensateur de couplage. Si vous revenez à la figure 9-12, vous vous souviendrez que le changement brusque du potentiel d'une des plaques d'un condensateur, envoie une impulsion de déplacement de courant à l'autre plaque. Il s'agit d'une impulsion positive quand la première plaque subit une augmentation de tension rapide, mais il s'agira d'une impulsion basse si la tension décroît brusquement.

Il n'est pas très correct de raisonner en termes « d'impulsion haute » ou « d'impulsion basse », car chacune de ces situations correspond à un écoulement de courant dans un sens ou l'autre, mais c'est un raisonnement qui facilite la compréhension de ce qui se passe.

Je me demandais s'il était possible de connecter les capteurs comme sur la figure 17-9. Quand les interrupteurs sont fermés, le courant s'écoule uniquement dans la résistance de rappel qui est contrariée par la connexion au positif de l'alimentation à extrémité de la chaîne d'interrupteurs.

La résistance de tirage reliée à la broche 2 de IC2 maintient cette dernière au niveau haut, le temporisateur est content de ne rien faire.

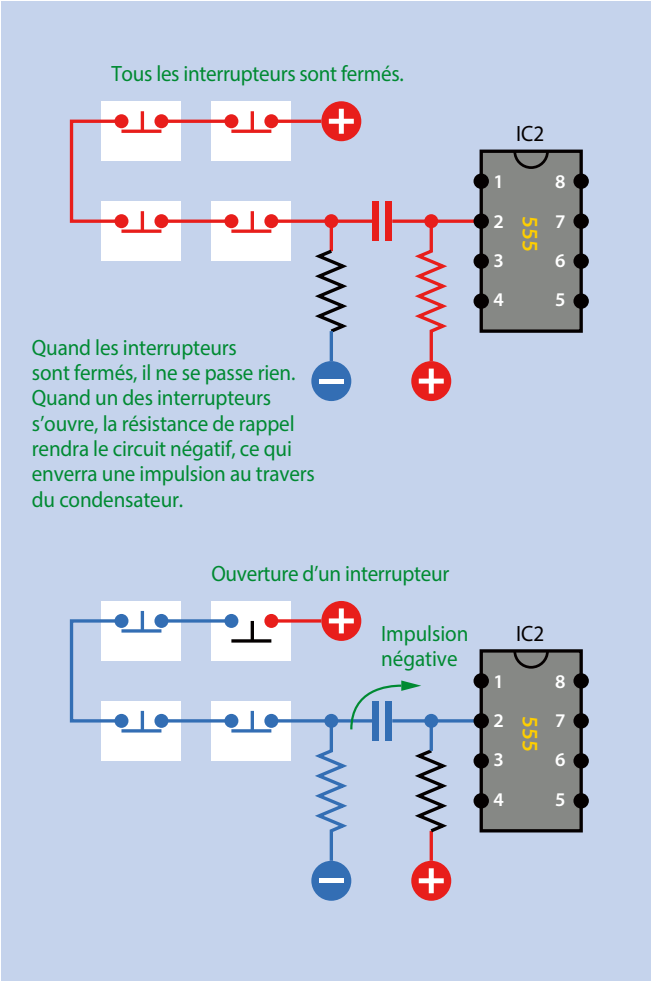


Figure 17-9. *Câblage des interrupteurs des capteurs afin de générer une impulsion négative.*

Quand un interrupteur est ouvert, comme le montre la partie inférieure de la figure 17-9, la connexion positive est brusquement interrompue. L'extrémité gauche du condensateur devient négative, en raison de la présence de la résistance de rappel. Cette variation soudaine de la tension génère une impulsion de niveau bas au travers du condensateur, ce qui contrarie l'influence de la résistance de tirage.

Les couleurs, sur le schéma, sont un peu excessives, car l'entrée de la puce n'atteindra pas le niveau de la tension d'alimentation, et quand un interrupteur s'ouvre (dans la moitié inférieure du schéma), le circuit n'atteint pas le niveau de la masse 0 V CC. Mais ce sera cependant assez proche de ces valeurs.

Est-ce que cela allait fonctionner ? Le seul moyen de le savoir est de le réaliser sur la plaque de montage. Mais non, le fonctionnement n'est pas fiable.

Grosse déception ! Si un système d'alarme n'est pas fiable, il est inutilisable, et à ce point, j'étais découragé et perturbé par le manque de réussite dans ce projet que je pensais être simple.

Dans une telle situation, le mieux est de faire une pause. En reprenant, mes idées étaient plus claires, j'étais convaincu que cela ***devait*** fonctionner. Alors, comme précédemment, j'ai utilisé une approche méthodique. J'ai d'abord essayé de modifier la valeur de la résistance de tirage (qui doit être présente pour maintenir l'entrée de IC2 positive en l'absence d'évènement). J'ai également modifié la valeur de la résistance de rappel ainsi que celle du condensateur (dont la valeur doit être suffisamment grande pour délivrer une impulsion substantielle).

Initialement, j'avais utilisé un condensateur de 0,1 µF et deux résistances de 10K. J'ai abouti à un condensateur de 0,47 µF, une résistance de rappel de 10K, et une résistance de tirage de 47K. J'ai alors obtenu une impulsion négative atteignant un niveau inférieur à 1 V en la mesurant sur la gâchette du temporisateur. C'était ainsi bien en dessous des 3 V nécessaires au déclenchement du temporisateur.

Cela allait finalement pouvoir fonctionner.

Il me fallait alors revenir en arrière et inclure IC1 et sa diode. Je devais encore m'assurer que, quand la sortie de IC1 passe au niveau haut durant le délai de sortie, un courant positif circule dans la diode, qui soit suffisamment élevé pour maintenir la broche 2 de IC2 au niveau haut, et ainsi lui permettre d'ignorer l'état des capteurs. En d'autres termes, la tension positive supprimera toute impulsion négative transmise par le condensateur. La figure 17-10 montre ce que j'avais imaginé.

Il s'avère que le fonctionnement était correct quand je mesurais la tension sur la broche de la gâchette d'IC2. Je

pouvais donc continuer la réalisation du circuit final. Morale de cette histoire : quand quelque chose ne fonctionne pas, faites une pause et soyez méthodique.

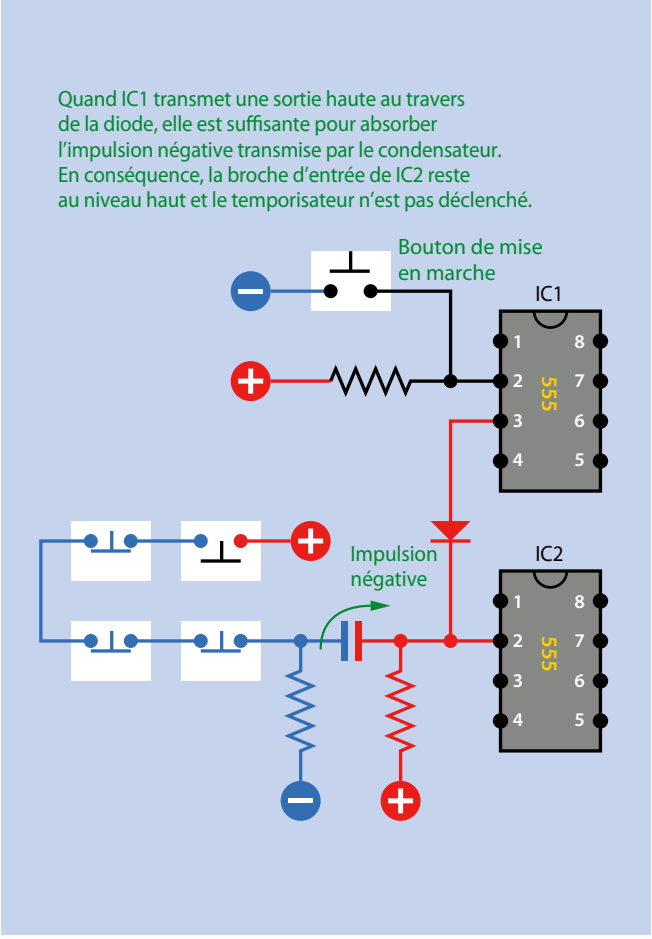


Figure 17-10. *Le courant positif provenant d'IC1, transmis par la diode doit être suffisant pour supprimer l'impulsion négative transmise par le condensateur.*

J'ai également trouvé comment IC2 pouvait déclencher IC3. Il me fallait les relier par un condensateur de couplage pour créer une autre impulsion basse. Je vais l'expliquer par la suite. Le plan du circuit complet sur la plaque de montage est sur la figure 17-11. Si le nombre de composants paraît imposant, rappelez-vous que les résistances, condensateurs placés près de chaque temporisateur sont les mêmes que ceux du circuit de test que vous avez réalisé pour l'expérience 15. La seule différence concerne la façon dont les temporisateurs sont interconnectés.

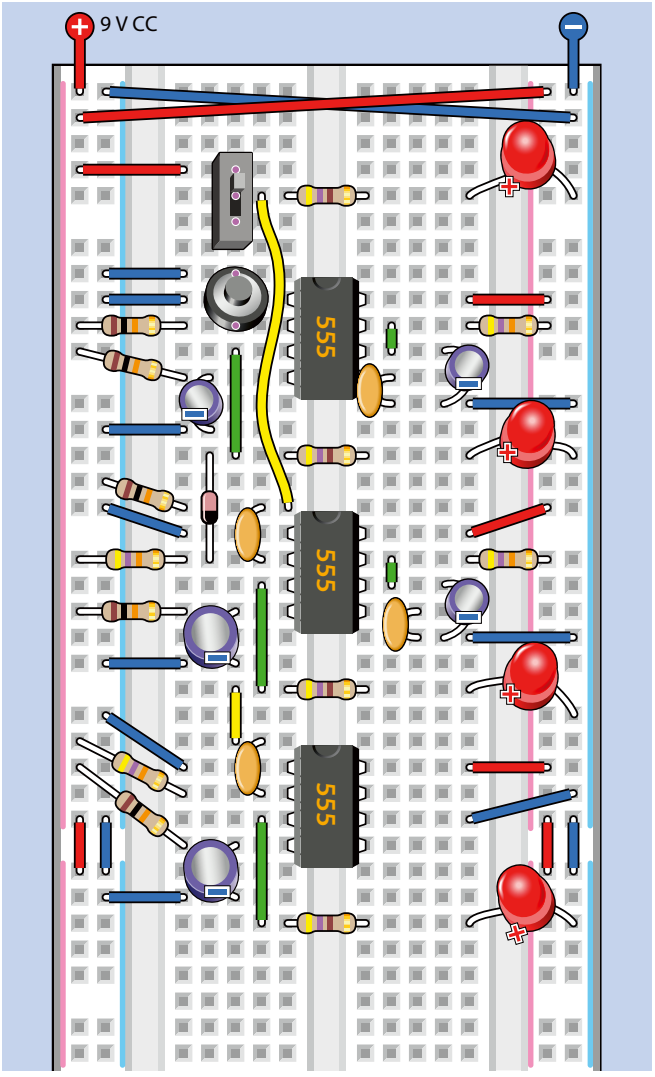
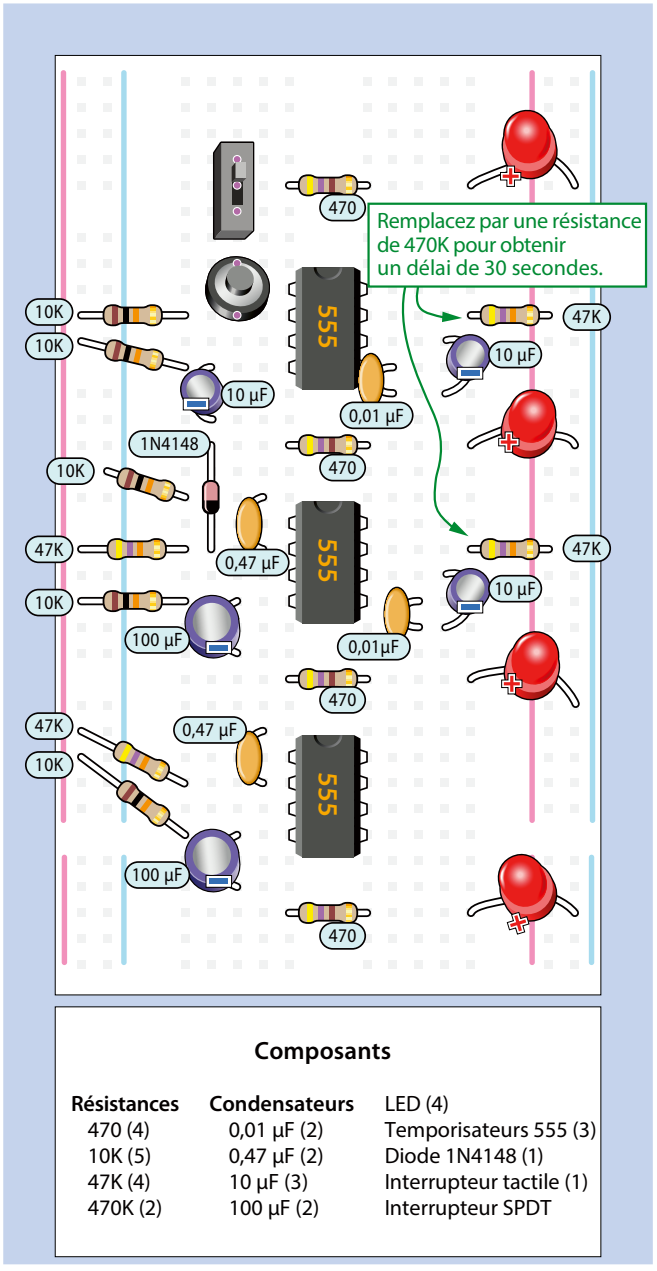


Figure 17-11. *Circuit complet du système d'alarme anti-intrusion.*

Je n'ai placé qu'un seul interrupteur en haut de la plaque, pour simuler la chaîne de capteurs d'un système d'alarme réel. Quand l'interrupteur est fermé, c'est comme si tous les interrupteurs d'une chaîne de capteurs étaient fermés. Quand l'interrupteur est ouvert, il simule l'ouverture d'un des interrupteurs de la chaîne de capteurs.

Sur la figure 17-12, vous verrez les valeurs des composants.



Composants

Résistances	Condensateurs	
470 (4)	0,01 µF (2)	LED (4)
10K (5)	0,47 µF (2)	Temporisateurs 555 (3)
47K (4)	10 µF (3)	Diode 1N4148 (1)
470K (2)	100 µF (2)	Interrupteur tactile (1)
		Interrupteur SPDT

Figure 17-12. *Plan du circuit de l'alarme anti-intrusion, ne comportant que les composants.*

Notez que pour le développement et les tests, j'ai utilisé des résistances de temporisation de 47K. Elles permettent de limiter les délais à 3 secondes, pour m'éviter d'attendre pendant 30 secondes durant les tests du circuit. Si vous réalisez le circuit, utilisez des résistances de 470K. Elles sont prévues dans la liste des composants.

Le schéma du circuit se trouve sur la figure 17-13. Vous pourrez voir que j'ai ajouté IC3, ainsi que C8, un autre condensateur de couplage. Quand le délai d'entrée créé par IC2 se termine, la brusque diminution de la tension de sa broche de sortie crée une impulsion négative au travers de C8. Cette impulsion déclenche IC3 qui est configuré en mode bistable, ainsi, sa sortie est maintenue au niveau bas ou haut. Dans le schéma, sa sortie est reliée à une LED qui vous permet de voir ce qui se passe, mais dans le cas d'une alarme réelle, la sortie de IC3 serait utilisée comme alimentation d'un circuit sonore d'alerte.

Il pourrait s'agir d'un buzzer, ou l'un des multivibrateurs que j'ai décrits précédemment. La sortie de 8 V CC fournie par IC3 est suffisante pour alimenter un de ces circuits.

Pour tester le circuit, fermez d'abord l'interrupteur capteur, pour simuler la fermeture de toutes les issues du local où est installée l'alarme. La LED D1 s'allume pour confirmer la continuité de tous les capteurs.

Vous pouvez maintenant appuyer sur le bouton de mise en marche ce qui allume D2, indiquant que le «délai de sortie» s'écoule, et que vous avez 30 secondes pour sortir. Aussi longtemps que D2 est allumée, le délai de sortie est en cours. Vous pouvez alors ouvrir l'interrupteur des capteurs, il ne se passera rien. Si vous utilisez les valeurs de test pour C1 et R3, le délai ne durera que trois secondes, ce qui est suffisant pour que vous puissiez ouvrir, puis fermer l'interrupteur de simulation des capteurs.

Lorsque le délai de sortie est épuisé, D2 s'éteint. L'alarme est maintenant activée et prête, si l'interrupteur du capteur s'ouvre, une impulsion négative transmise par C4 déclenche IC2 qui entame le délai d'entrée. Durant cette période, D3 est allumée pour vous prévenir que vous pouvez arrêter le système d'alarme pendant un temps limité.

À la fin du délai d'entrée, la sortie de la broche 3 d'IC2 passe au niveau bas, ce qui génère une impulsion négative transmise par C8. Cette impulsion déclenche IC3 qui demeure activé, car il est configuré en mode bistable. D4 s'allume, pour vous indiquer que si un dispositif sonore était présent,

il serait alimenté par IC3 et avertirait de l'intrusion en émettant un son.

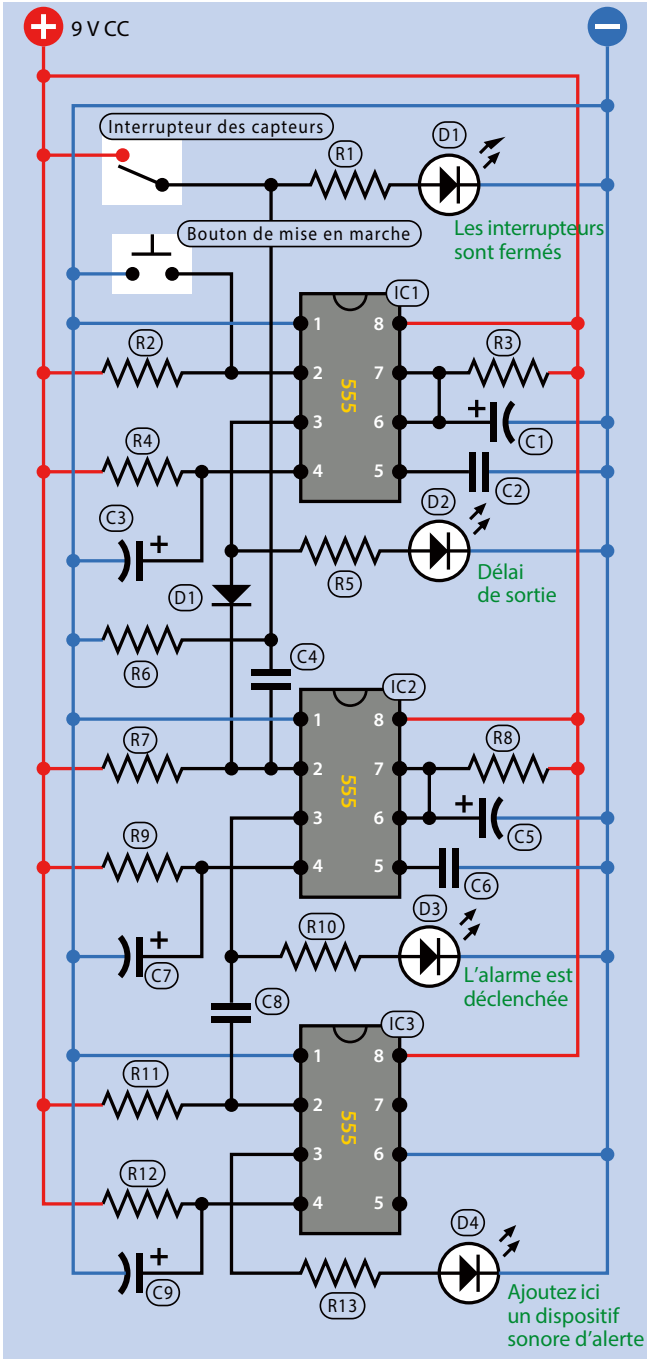


Figure 17-13. *Schéma de l'alarme anti-intrusion.*

Si cette séquence ne vous semble pas très claire, j'ai ajouté un diagramme fonctionnel sur la figure 17-14 montrant les interactions entre les temporisateurs qui se déclenchent mutuellement.

Le seul défaut que j'ai constaté durant les tests était le déclenchement parasite d'IC2 qui se produisait parfois lors de la mise sous tension initiale du circuit. Cela était peut-être dû à la grande longueur du fil reliant la broche de sa gâchette, j'y ai remédié en augmentant la valeur des condensateurs C7 et C9 à 100 µF au lieu de la traditionnelle valeur de 1 µF que j'utilise pour supprimer l'impulsion initiale.

Ces condensateurs de 100 µF peuvent avoir un inconvénient quand l'alimentation est coupée, puis rétablie très rapidement. Ils ont alors conservé une certaine charge, de ce fait ils déclenchent IC2 et IC3 au lieu de les en empêcher. Pour éviter ce problème, attendez une dizaine de secondes avant de remettre le circuit sous tension.

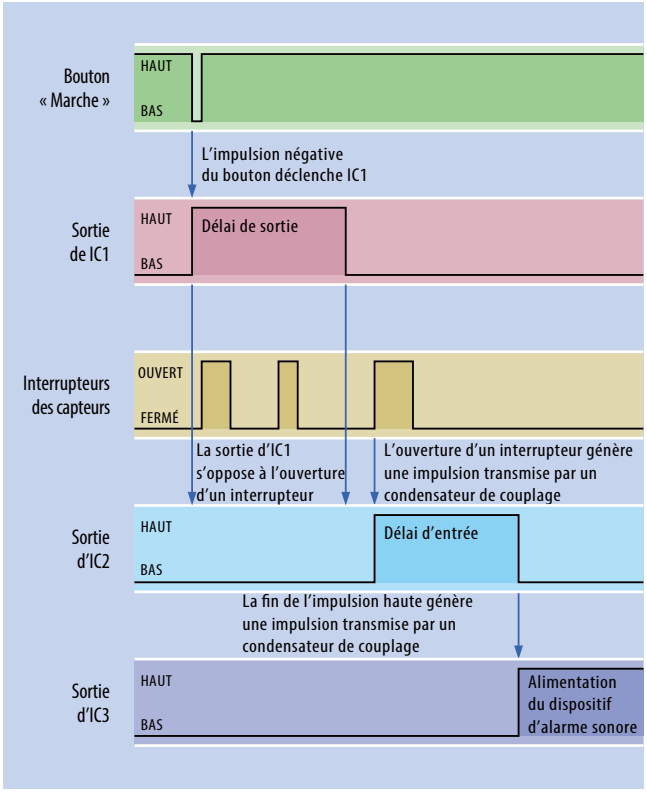


Figure 17-14. *Interactions entre les temporisateurs.*

Après avoir terminé de tester le circuit, j'ai commencé à réfléchir à quelques ajouts fonctionnels. En particulier, j'aimerais ajouter un temporisateur 555 supplémentaire pour ajouter une série de bips pendant le délai de sortie, ce qui produirait une sensation d'urgence. Cette fonctionnalité pourrait également être mise en œuvre durant le délai d'entrée, afin de rappeler qu'il est urgent d'arrêter le système d'alarme. Je vous laisse le soin de réfléchir à cet ajout.

Une autre fonctionnalité intéressante serait l'ajout d'un clavier obligeant à entrer un code pour désactiver l'alarme. Je vous présenterai un circuit avec un clavier dans la prochaine expérience, mais je pense avoir maintenant élaboré suffisamment le projet d'alarme.

Finalisation du projet

Si vous souhaitez réaliser le circuit de cette alarme anti-intrusion sous forme définitive, je vais vous montrer les différentes étapes à suivre.

Ce circuit convient parfaitement à une plaque perforée avec des pistes de cuivre gravées correspondant au format de votre plaque de montage. En fait, les composants peuvent être implantés sur une plaque demi-largeur comme celle de la figure 17-15 que je me suis procurée auprès d'Adafruit, l'un des fournisseurs indiqués dans l'annexe B. (Pensez à utiliser des supports pour les temporisateurs. Voir la figure 15-4.)

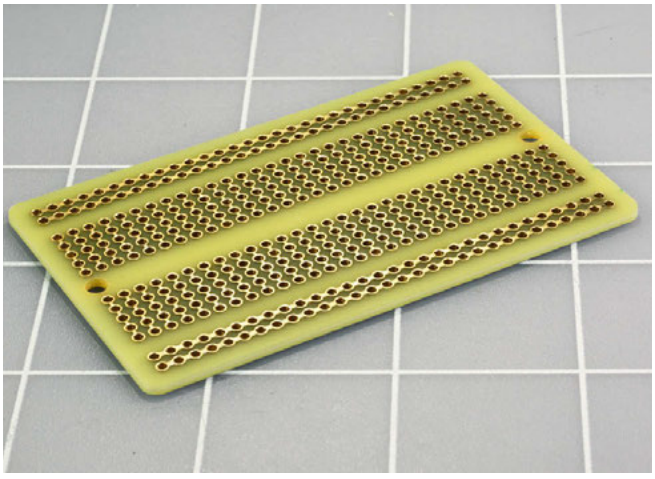


Figure 17-15. *Plaque perforée demi-largeur munie de pistes gravées selon le format d'une plaque de montage.*

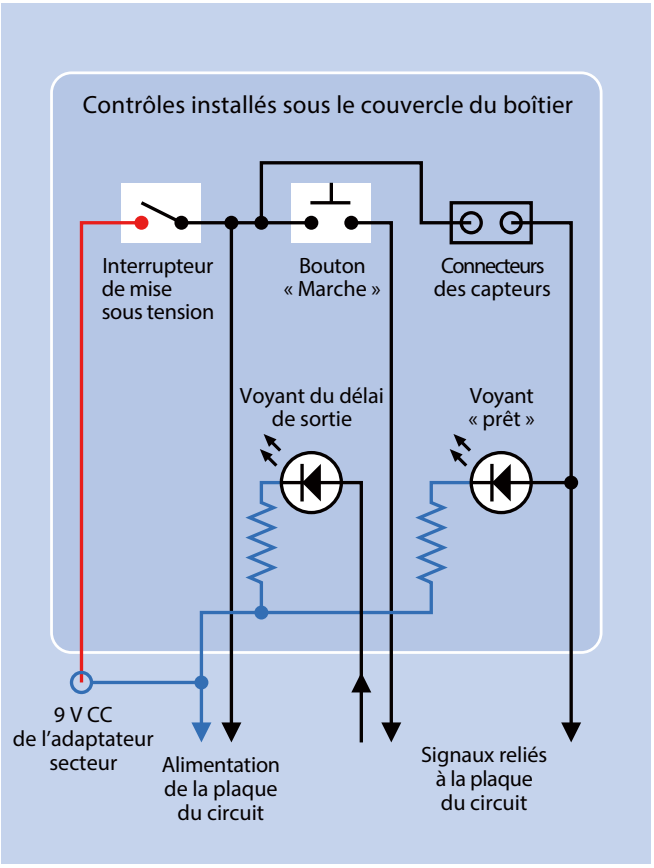


Figure 17-16. *Ces composants pourront être installés sous le couvercle du boîtier du montage.*

Sur la figure 17-16, j'indique les composants qui peuvent être déportés sous le couvercle du boîtier du système.

Sur la figure 17-17, vous pouvez voir le circuit réduit après avoir situé les éléments de contrôle en dehors de la plaque perforée.

Le choix de l'interrupteur de mise sous tension, du bouton « Marche » des LED et des connecteurs des fils des capteurs peut être fait selon vos préférences. Préférez-vous des LED de 3 mm ou de 5 mm ? Préférez-vous un gros interrupteur ou un petit ? Personnellement, quand j'achète des interrupteurs, je préfère les choisir visuellement, plutôt que de les acheter en ligne, c'est pourquoi je les achète souvent auprès des magasins d'accessoires automobiles, ou dans les magasins de bricolage.

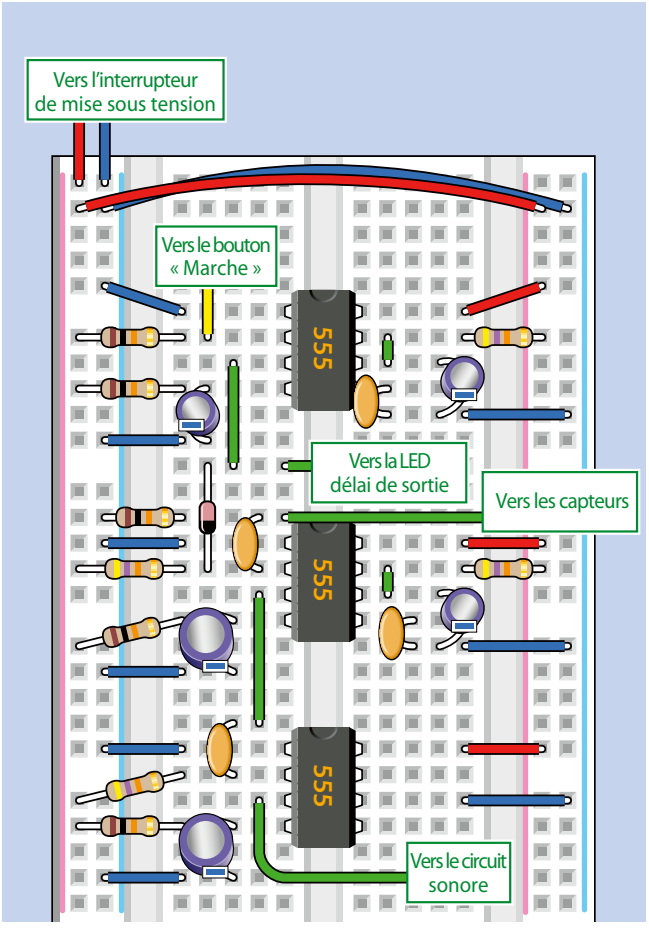


Figure 17-17. *Si les LED, les interrupteurs et le bouton-poussoir sont montés sous le couvercle du boîtier, le reste de composants peut facilement trouver place sur une plaque perforée de demi-largeur.*

Si vous utilisez un boîtier en plastique, vous pouvez imprimer un plan comme celui de la figure 17-18, puis après l'avoir placé sous le couvercle, utiliser un poinçon pour marquer les repères des éléments avant de perforer le couvercle avec des forets de diamètres appropriés comme sur la figure 17-19.

Je suppose que si vous prenez la peine de mettre votre circuit dans un boîtier, vous souhaitez souder les composants. À ce sujet, il est plus facile d'utiliser une plaque perforée gravée qu'une plaque vierge comme celle utilisée dans l'expérience 14. Les figures 17-20 à 17-23 montrent comment procéder. J'ai utilisé une représentation 3D car les soudures sont difficiles à photographier.

Figure 17-18. *Plan de localisation des interrupteurs et des LED sous le couvercle du boîtier.*

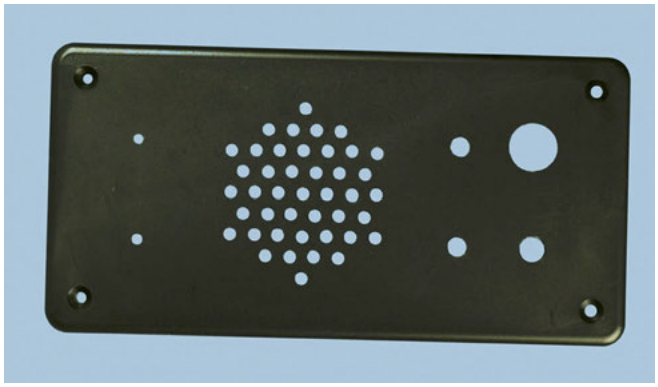


Figure 17-19. *Le couvercle du boîtier après perçage.*

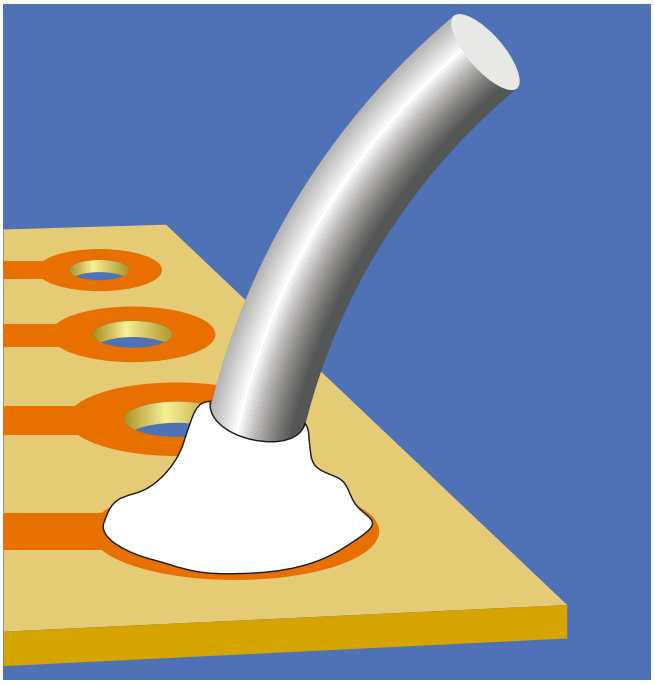


Figure 17-20. *Dessous de la plaque perforée montrant une quantité optimale de métal d'apport de soudure.*

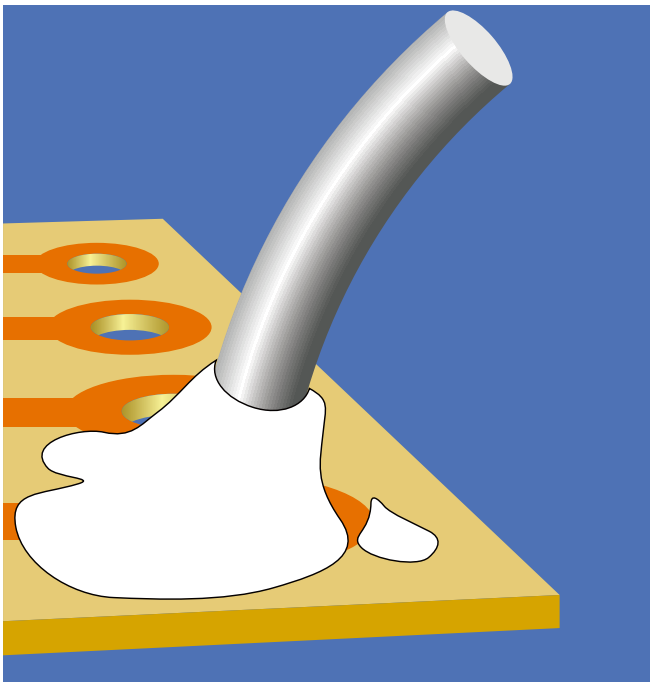


Figure 17-22. *Si vous déposez trop de métal d'apport, il pourrait entrer en contact à des endroits non désirés.*

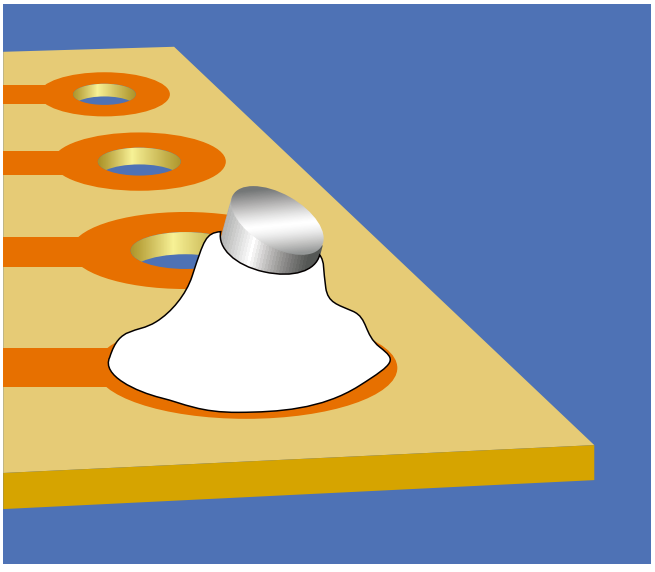


Figure 17-21. *Après que la soudure a refroidi et s'est solidifiée, l'excédent du fil doit être coupé.*

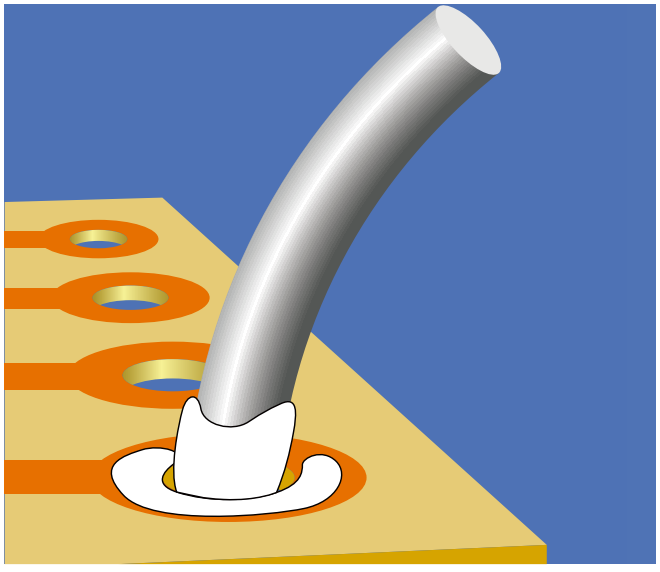


Figure 17-23. *Trop peu de métal d'apport entre le fil et la piste de cuivre peut provoquer des liaisons défectueuses de façon intermittente.*

Maintenez la plaque perforée dans une troisième main ou tout autre moyen comparable, pliez légèrement les fils de composants pour éviter qu'ils ne tombent de la plaque, puis rappelez-vous qu'il faut chauffer le fil *ET* la piste de cuivre de la plaque avant d'appliquer le métal d'apport. Après cinq ou dix secondes, le métal d'apport devrait commencer à couler.

Déposez assez de métal d'apport pour former une goutte arrondie entourant le fil et le cuivre, comme sur la figure 17-20. Attendez que la soudure soit complètement solidifiée, saisissez le fil avec la pince plate à bec long, afin de vérifier que la soudure est solide. Si tout est correct, coupez la partie du fil dépassant du point de soudure avec votre cutter, comme le montre la figure 17-21.

Erreurs courantes avec les plaques perforées

Trop de métal d'apport. Sans que vous le sachiez, le métal d'apport s'étale sur les pistes adjacentes et y crée un contact, comme le montre la figure 17-22. En ce cas, vous pouvez aspirer l'excédent de métal d'apport avec un outil de dessoudage, ou l'éliminer avec un couteau. Personnellement je préfère utiliser un cutter, car si vous l'aspirez avec une pompe à dessouder ou à l'aide de tresse à dessouder, il risque d'en subsister.

Une trace, même microscopique, suffit à créer un court-circuit. Vérifiez vos liaisons avec une loupe en modifiant l'orientation de la plaque afin que la lumière change de direction.

Pas assez de métal d'apport. Si le point de soudure est trop petit, le fil risque de s'échapper pendant le refroidissement. Une fêlure, même microscopique, suffit pour provoquer une panne du circuit. Parfois, la soudure adhère au fil et à la trace de cuivre, mais ne réalise pas pour autant une liaison solide, le fil et le cuivre étant entourés de soudure sans se toucher, comme sur la figure 17-23. Il peut être difficile de le voir sans utiliser une loupe. Vous devez ajouter du métal d'apport à toute jonction qui n'en a pas suffisamment, en prenant soin de chauffer à nouveau correctement les points de soudure.

Composants mal placés. Il est très facile d'insérer un composant à un trou d'écart de sa position correcte. Il est également courant d'oublier de réaliser une connexion. Je vous suggère d'imprimer un schéma à grande échelle, et à chaque fois que vous faites une liaison sur votre plaque perforée, de marquer au surligneur cette connexion sur le schéma.

Petits éclats. Quand vous coupez les fils, les petits fragments de fils ne sont pas toujours évacués. Ils s'incrustent dans votre travail et risquent de créer des liaisons non voulues sur la plaque perforée du circuit.

Nettoyez soigneusement le dessous de la plaque avec une brosse à dents usagée avant de la mettre sous tension. Essayez de maintenir votre environnement de travail le plus propre possible. Plus vous serez méticuleux, moins vous aurez de problèmes.

Je vais encore me répéter, mais vérifiez toujours avec soin vos soudures avec une loupe.

Recherche des erreurs sur une plaque perforée

Si le circuit qui fonctionnait précédemment sur une plaque de montage, ne fonctionne plus après que vous l'avez soudé sur une plaque perforée, la recherche des erreurs sera un peu différente de celle que j'avais décrite précédemment.

Commencez par vérifier le placement des composants, c'est le plus facile à contrôler. Si tous les composants sont correctement placés, reliez le fil noir de votre multimètre à la masse négative de l'alimentation, mettez sous tension, et parcourez votre circuit de point en point de haut en bas. Vérifiez la tension présente à chaque point en y reliant le fil rouge du multimètre, tout en pliant légèrement la plaque du circuit. Dans la plupart des circuits, chaque composant doit indiquer la présence d'une certaine tension. Si une zone semble morte, ou si votre multimètre varie de façon intempestive, vous pouvez localiser une jonction soudée qui présente un problème, même si elle paraît être visuellement correcte.

Rappelez-vous qu'une fissure de quelques microns suffit à empêcher le fonctionnement de votre circuit.

La figure 17-24 monte une plaque perforée en cours de réalisation.

Figure 17-24. *L'apparence de cette plaque n'est pas des plus réussie, mais c'est un travail correct.*

Installation dans le boîtier

Vous pouvez utiliser de l'Araldite pour coller vos LED et le haut-parleur sous le couvercle de votre boîtier, comme sur la figure 17-25. Un interrupteur ou un bouton-poussoir est en général (mais pas systématiquement) muni d'un filetage et fourni avec un écrou et la rondelle correspondante. Si vous devez acheter un écrou pour un interrupteur que vous possédez, vous aurez le choix entre des dimensions et des pas de filetage métriques ou non. Le plus simple est de se procurer un ensemble d'interrupteurs avec leurs écrous.

Si vous possédez un pied à coulisse, il vous sera utile pour mesurer chaque pièce, et déterminer le diamètre de perçage correct. Sinon, il vous faudra utiliser une règle graduée pour les mesurer au mieux. Choisissez ensuite le foret le plus petit correspondant au diamètre du trou, il vous sera toujours possible de l'élargir si nécessaire. Il existe des *fraises* à main spécialement conçues pour élargir les trous par paliers. Un *outil d'ébavurage* peut également être utilisé dans ce but.

Le perçage de trous de grand diamètre da ns le plastique d'un boîtier est parfois délicat. Le foret a tendance à glisser et à créer des rayures. Vous pouvez éviter cela de trois façons différentes :

- Utiliser un foret Forstner qui permet de réaliser un trou parfait.
- Percer une série de trous de diamètres croissants
- Percer un petit trou de centrage et agrandir le trou avec un foret fraisoir qui n'abîmera pas le plastique comme un foret standard.

Figure 17-25. *Montage des composants sous le couvercle du boîtier.*

Quelle que soit votre approche, vous devrez maintenir le couvercle en place, sa face externe étant placée sur une petite planche en bois. Toujours percer du côté intérieur, ainsi, le foret traversera le plastique puis pénétrera dans le bois. Avant d'installer un interrupteur, utilisez votre multimètre pour déterminer les bornes qui sont reliées quand vous le manipulez afin de l'orienter correctement sur la face supérieure.

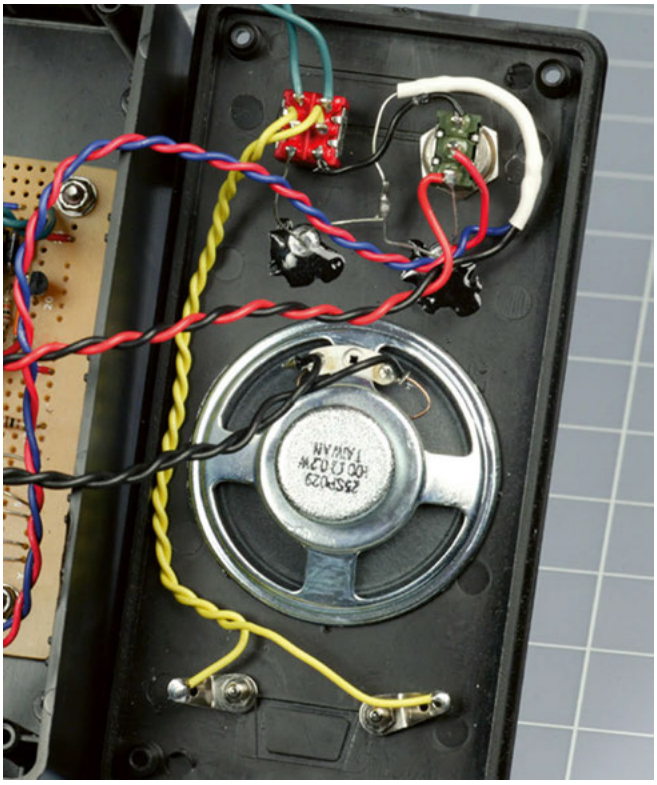


Figure 17-26. *Paires de fils torsadés reliant les éléments et la plaque du circuit.*

Rappelez-vous que la borne centrale d'un interrupteur bidirectionnel est souvent la borne commune. Vous n'avez besoin que d'un interrupteur unidirectionnel pour la mise sous tension du circuit, toutefois, j'ai utilisé un interrupteur bidirectionnel car je n'ai pas trouvé d'interrupteur unidirectionnel dans le style que je préfère.

Si vous soudez des fils ou des composants aux bornes d'un interrupteur, le fer à souder de 15 W pourrait avoir des difficultés à chauffer correctement les bornes qui évacueront la chaleur. L'utilisation d'un fer de 30 W vous facilitera la tâche. Dans tous les cas, vous devrez utiliser un moyen pour évacuer la chaleur en soudant vos LED.

La figure 17-26 montre des paires de fils torsadés reliant les composants installés sous le couvercle du boîtier. Dans des projets plus complexes que celui-ci, il est nécessaire d'éviter un enchevêtrement de fils reliant la face supérieure et le circuit imprimé en utilisant des *câbles plats* multicolores. Vous pouvez également utiliser des petites barrettes de connexions sécables qui vous permettront par la suite de retirer la plaque du circuit de son boîtier, si vous devez refaire une soudure défectueuse, ou pour le tester plus facilement.

Fixation de la plaque perforée

La plaque du circuit peut être logée au fond du boîtier, maintenue par quatre boulons de 3 mm munis de rondelles et d'écrous freins en nylon plutôt que de la coller, de cette façon la plaque est amovible. Les écrous freins éviteront qu'un écrou ne se desserre et tombe au fond du coffret, risquant alors de créer un court-circuit.

Vous devrez probablement percer des trous de montage dans votre plaque perforée. Vous devrez peut-être, également, la découper avec une petite scie à métaux. Souvenez-vous que les plaques perforées contiennent souvent de la fibre de verre qui peut user rapidement une scie à bois. Vérifiez qu'il n'y a pas présence de petits éclats de cuivre sur la face inférieure de votre plaque après l'avoir percée et découpée.

Utilisez des rondelles, ou des entretoises en nylon, sous votre plaque pour ne pas la fixer à même le fond du boîtier. L'épaisseur des soudures empêchera la plaque d'être à plat sur le fond, et si vous serrez fermement les écrous, un stress mécanique important imposé au circuit pourrait endommager une soudure ou une piste de cuivre sur la plaque.

Si vous utilisez un boîtier en aluminium, il faudra placer une feuille de matériau isolant sous votre plaque perforée pour éviter qu'elle n'entre en contact avec le boîtier, créant des courts-circuits.

Vous pouvez choisir le matériau qui vous convient le mieux. Par exemple un tapis de souris inutilisé en le découpant pour qu'il convienne, ou une feuille de plastique à placer au fond des tiroirs des meubles de cuisine. Quoi que vous utilisiez, ce doit être souple et doux.

Si vous prévoyez de générer le signal sonore d'alerte en utilisant l'un des multivibrateurs astables que nous avons réalisés précédemment, il faudra le créer sur une autre plaque. En faisant preuve de créativité, vous pourrez

l'empiler avec la plaque principale. Il ne serait pas inutile de les envelopper avec une double couche de film à bulles entre elles. Je ne pense pas que quiconque vienne regarder l'intérieur du boîtier, je ne suis pas vraiment inquiet des apparences.

Câblage de l'installation

Pour relier votre boîtier aux capteurs de l'alarme, vous pouvez prévoir une paire de *bornes à visser* sur votre boîtier. Ma version terminée, équipée des bornes à vis en partie inférieure, se trouve sur la figure 17-27.

Figure 17-27. *Le boîtier terminé.*

Si vous envisagez de terminer ce projet en installant des capteurs à interrupteurs, vérifiez-les un par un en déplaçant le module aimanté près du module interrupteur, puis en l'éloignant, en utilisant votre multimètre pour vérifier la continuité.

> *Rappelez-vous, l'interrupteur doit être fermé quand il est proche de l'aimant, et ouvert quand l'aimant est éloigné.*

Avant d'installer les interrupteurs, faites un plan montrant la façon dont vous allez les relier. Rappelez-vous qu'ils doivent toujours être reliés en série, pas en parallèle. Vous pouvez vous reporter à la figure 17-5 pour revoir le principe du câblage des capteurs d'intrusion. La figure 17-28 montre comment relier les câbles à deux conducteurs afin que les interrupteurs soient connectés en série. Si vous souhaitez isoler les jonctions avec de la gaine thermorétractable, pensez à insérer les petites longueurs de gaine *avant* de faire les soudures, et évitez de chauffer les gaines involontairement avec votre fer à souder. Prévoyez environ 5 cm de fil en plus à chaque extrémité et coupez-les après avoir terminé vos soudures.

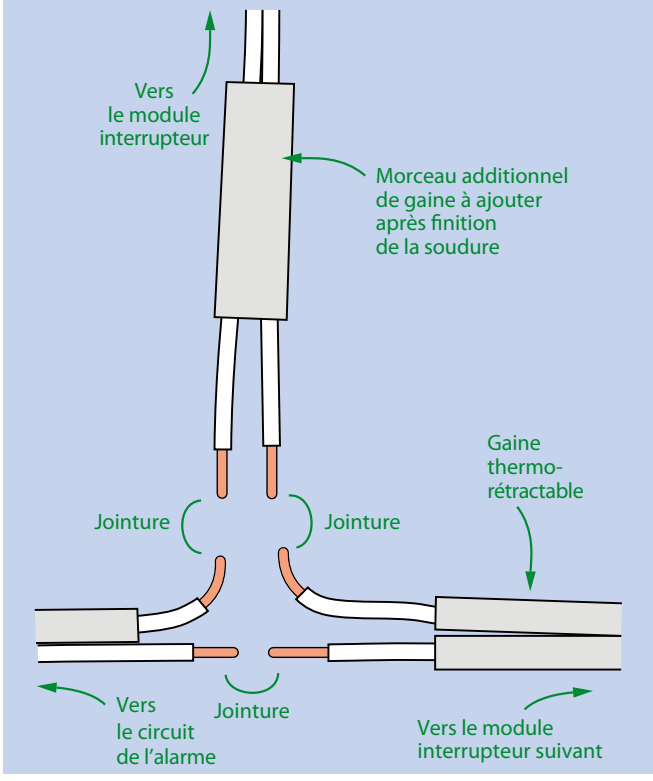


Figure 17-28. *Ajout d'une branche à votre câblage.*

Le câble de sonnerie à deux conducteurs prévus pour les faibles tensions, vendu pour connecter une sonnette, ou un thermostat d'ambiance de chauffage, conviendra parfaitement au câblage des capteurs d'alarme. Le diamètre de ses fils devra être d'environ 0,8 mm (jauge 20). Vous devrez pouvoir vérifier que la résistance totale du circuit est inférieure à 50 ohms quand votre câblage sera terminé.

Après avoir installé tous les capteurs, réglez votre multimètre pour le test de continuité et reliez-le à votre circuit. Ouvrez les portes et les fenêtres une par une afin de vérifier que le circuit de détection fonctionne correctement. Si tout est correct, reliez les fils des capteurs aux bornes à visser du boîtier.

Il ne vous reste plus qu'à inscrire les fonctions de l'interrupteur, du bouton-poussoir, des LED et des bornes à visser sur le couvercle de votre boîtier. Vous connaissez leurs rôles, mais ce n'est pas le cas de tout le monde, et vous pourriez souhaiter que quelqu'un puisse utiliser votre alarme quand vous êtes absent, De toute façon, dans quelques mois ou années, vous auriez vous-même oublié ces détails.

Conclusion

Voici un résumé des étapes de ce projet :

- Imaginer comment vous allez utiliser le système.
- Choisir les composants appropriés.
- Dessiner un diagramme fonctionnel.
- Dessiner un schéma simplifié.
- Assembler quelques composants et faire un premier test rapide.
- Revoir votre concept si cela ne fonctionne pas.
- Installer les composants sur une plaque de montage et tester l'ensemble.
- Transférer le montage sur une plaque perforée, tester à nouveau et rechercher les dysfonctionnements.
- Ajouter les interrupteurs, les boutons-poussoirs, le connecteur d'alimentation et les bornes de connexions.
- Installer le tout dans votre boîtier et inscrire les fonctions des éléments sur le boîtier.

Expérience 18
Testeur de réflexes

Le temporisateur 555 pouvant fonctionner à des millions de cycles par seconde, vous pouvez vous en servir pour mesurer les réflexes humains. Ainsi, vous pourrez vous confronter à vos amis pour déterminer qui fournit le plus rapidement une réponse, et voir comment votre délai de réponse évolue selon votre humeur, l'heure du jour ou de votre quantité de sommeil la nuit précédente.

Ce circuit tient sur une plaque de montage ne comportant que 60 rangées de trous, et si vous travaillez soigneusement, le projet peut être terminé en deux heures.

Vous aurez besoin de :

- 1 plaque d'essais, des fils de liaison, une pince coupante, une pince à dénuder, un multimètre
- 1 source d'alimentation de 9 V CC (de préférence, un adaptateur secteur)
- 3 circuits intégrés compteur 4026B
- 3 temporisateurs 555
- résistances : 470 ohms (2), 1K (3), 4,7K (1), 10K (5), 47K (1), 470K (2)
- condensateurs : 0,01 µF (2), 0,047 µF (1), 0,47 µF (2), 10 µF (1), 100 µF (1)
- 3 interrupteurs tactiles
- 2 LED rouges et 1 jaune, de diamètre 3 mm de préférence
- 1 potentiomètre ajustable
- 3 afficheurs 7 segments à LED, d'environ 12,7 mm × 19 mm, si possible de couleur rouge et dont les broches sont espacées de 0,254 mm (0,1"). Par exemple :

  Lite-On `LTS-547AHR`
  Kingbright `SC56-21EWA`
  Broadcom/Avago `HDSP-513E`
  Inolux `INND-TS56RCB`

Attention : protégez les circuits intégrés de l'électricité statique

Le temporisateur 555 n'est pas facile à endommager, mais dans cette expérience, vous allez également utiliser une puce CMOS (le compteur 4026B) qui est beaucoup plus vulnérable aux décharges d'électricité statique.

Si vous manipulez une puce en la tenant entre vos doigts, tout dépendra de paramètres comme l'humidité ambiante, le type de chaussures que vous portez et le matériau du sol de votre local de travail. Certaines personnes accumulent plus facilement les charges électrostatiques que d'autres, je ne sais pas pourquoi. Personnellement, je n'ai jamais détruit une puce par l'électricité statique, mais je connais des gens à qui c'est arrivé.

Si les décharges électrostatiques présentent un risque en ce qui vous concerne, vous devriez le savoir, car vous recevez probablement des chocs électriques soudains quand vous touchez une poignée de porte métallique ou un robinet. Si vous pensez que vous devez protéger les circuits intégrés de ce type de décharge, la meilleure précaution est de vous relier vous-même à la terre. La *mauvaise façon* serait d'enrouler un fil dénudé autour de votre poignet, et de le relier à un gros objet métallique. C'est une mauvaise idée, car si vous recevez une décharge électrique de l'autre main, le courant s'écoulerait vers la terre, au travers de votre corps.

La *meilleure façon* est d'investir dans un bracelet antistatique. Il comprend une résistance de valeur suffisante pour vous protéger, tout en permettant l'écoulement des charges électrostatiques à la terre. Le cordon de ces bracelets se termine le plus souvent par une pince crocodile. Idéalement, vous devrez la relier à un tuyau d'eau en cuivre ou en acier, mais une armoire métallique conviendra également.

> *Ne vous reliez jamais à la terre par une prise de courant. Ce serait dangereux.*

Quand vous recevez des circuits intégrés commandés en ligne, ils sont habituellement envoyés dans des réglettes en plastique conducteur, ou insérés dans un petit bloc de mousse conductrice. Le plastique ou la mousse protège les puces en maintenant toutes leurs broches au même potentiel électrique. Si vous devez remballer vos puces, mais ne souhaitez pas utiliser de mousse, vous pouvez insérer leurs broches dans une feuille d'aluminium.

Démonstration rapide

Les afficheurs numériques que je vous ai recommandés pour ce projet ont un brochage standardisé pour cette taille d'affichage. Si vous utilisez un afficheur de taille différente, son brochage pourrait être différent. De plus s'il est de dimensions plus importantes, vous ne pourrez pas le faire tenir avec les autres composants sur la plaque de montage. Le type recommandé est représenté sur la figure 18-1.

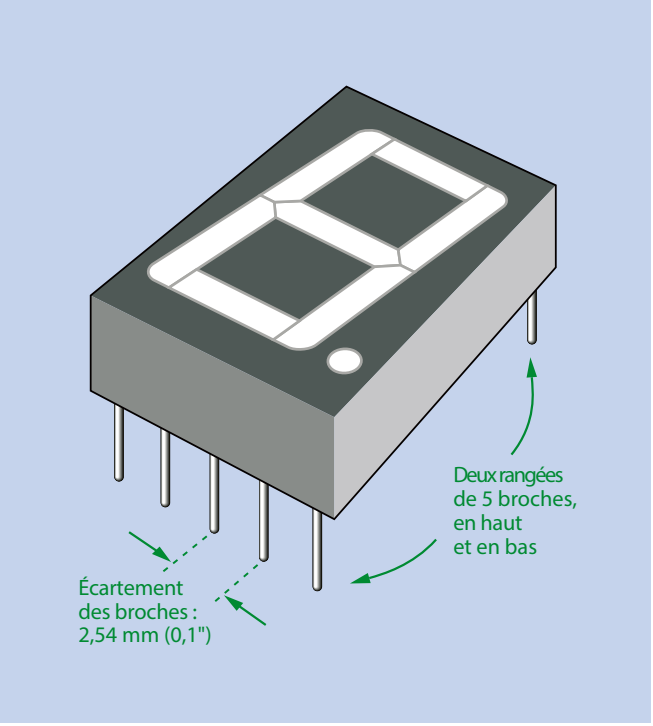


Figure 18-1. *Afficheur 7 segments utilisé dans cette expérience.*

Le fond de certains afficheurs est noir, pour d'autres, il est blanc. Dans notre cas, cela importe peu. Quand l'afficheur est allumé, ses segments peuvent être de couleur rouge, ambre, vert ou bleu ; selon mon expérience, la couleur rouge est plus visible sous la faible intensité qui lui sera fournie par le circuit de ce projet.

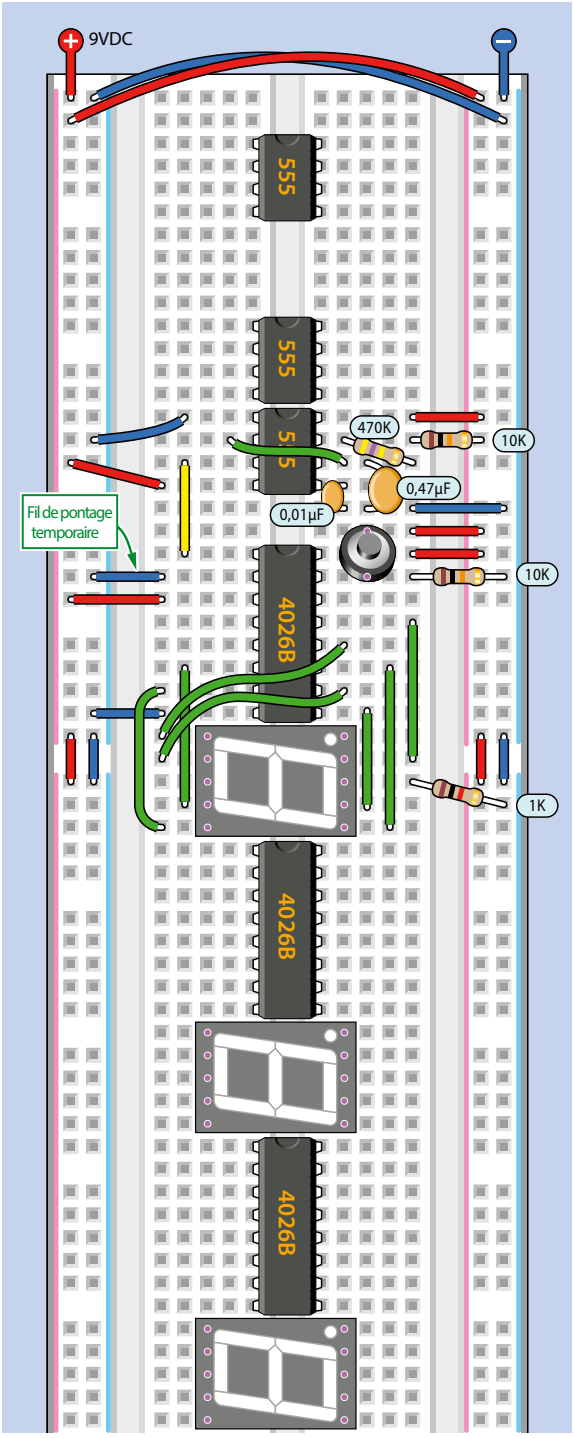


Figure 18-2. *Circuit de la démonstration rapide.*

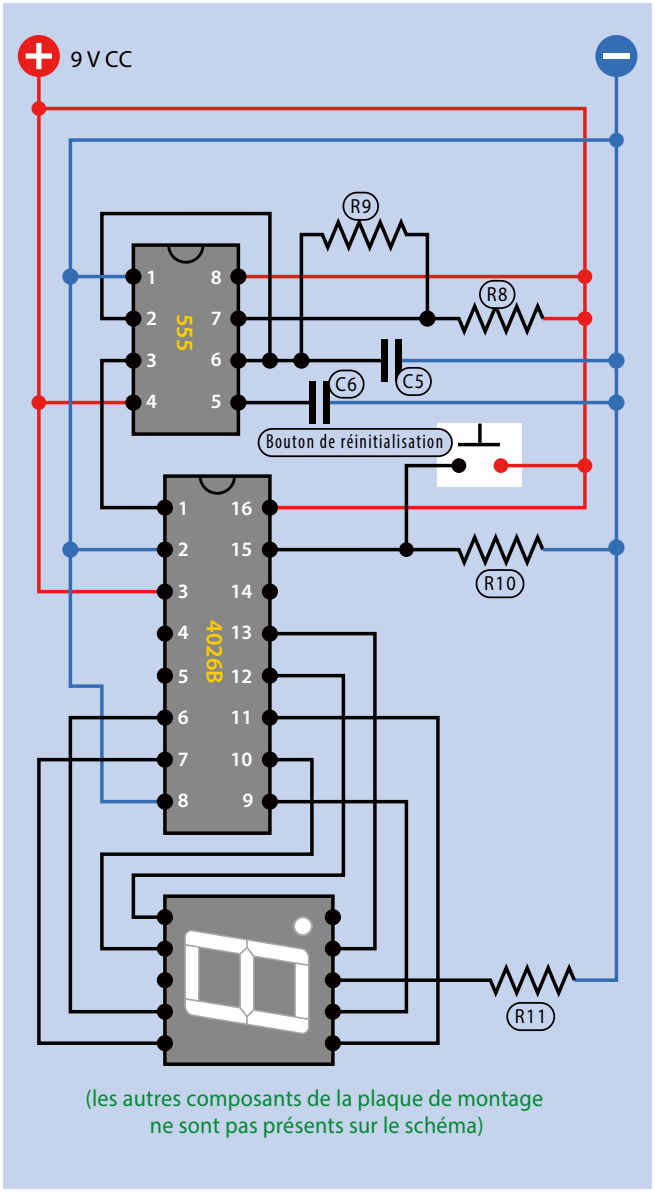


Figure 18-3. *Schéma du circuit de la figure 18-2.*

Je suggère que vous commenciez par un test rapide de cet afficheur et de la puce 4026B qui le pilotera. Le plan de la plaque de montage de ce circuit très simple, qui va réaliser un comptage de 0 à 9 indéfiniment, est représenté sur la figure 18-2. Son schéma est sur la figure 18-3. J'ai déjà prévu les circuits intégrés et les afficheurs que vous allez

utiliser par la suite dans cette expérience, car je souhaite que vous positionniez tout de manière précise sur la plaque. Procédez du haut vers le bas, en comptant précisément les rangées de trous ! Prenez soin de bien orienter les afficheurs numériques. Le point décimal de chaque afficheur doit se trouver en haut et à droite quand la plaque de montage est vue selon l'orientation habituelle. Un fil de pontage bleu est marqué temporaire, car il sera retiré quand les autres temporisateurs seront reliés ensemble, dans la seconde partie de cette expérience.

Alimentez le circuit à l'aide d'une pile de 9 V CC, ou de l'adaptateur secteur, l'afficheur numérique devrait compter de 0 à 9, de façon permanente.

Je vais maintenant vous expliquer ce qu'il se passe, en utilisant les repères de la figure 18-3. Ces repères peuvent vous sembler numérotés de façon erratique, c'est parce que je vais ajouter davantage de composants dans la seconde moitié de l'expérience.

Le temporisateur 555 est configuré en mode astable. Les résistances, et le condensateur de temporisation ne sont pas disposés comme précédemment car j'ai dû réserver de la place pour le reste du circuit. Les liaisons sont toutefois identiques à celles des expériences précédentes. La combinaison de R9 (470K) et C5 (0,47 µF) permet d'obtenir des impulsions de fréquence 3 Hz, ce qui vous permet de voir le changement des chiffres. Vous pouvez évidemment modifier radicalement la vitesse de défilement en diminuant les valeurs de ces composants.

Remarquez que la broche 3 de sortie du temporisateur est reliée directement à la broche 1 du compteur 4026B. Est-ce que cela indique au compteur à quelle vitesse il doit compter ? Oui, précisément !

Maintenez appuyé le bouton de réinitialisation, le compteur se remet à zéro. Relâchez le bouton, le compteur recommence à compter. R10 est une résistance de rappel, le bouton de réinitialisation contrarie son action, vous comprenez qu'un niveau haut sur la broche 15 impose une réinitialisation du compteur, alors qu'un niveau bas le laisse fonctionner.

Et si votre circuit ne fonctionne pas ? Si vous ne voyez aucun affichage, vérifiez les tensions en tout point du montage. Si certains segments sont visibles, mais mélangés, vous avez probablement commis une erreur au niveau des fils verts provenant du compteur. Il est assez facile de mal positionner certains de ces fils à un trou d'écart.

Si le chiffre 0 est affiché en permanence, vous avez câblé incorrectement le temporisateur 555, ou vous avez relié le temporisateur au compteur 4026B de façon incorrecte.

Ce circuit est la base du testeur de réflexes. Il ne vous reste qu'à connecter les deux autres digits et deux autres boutons, puis d'augmenter la vitesse de comptage. Mais je dois d'abord vous décrire les composants que vous utilisez.

Technique : les afficheurs à LED

Le terme « LED » peut prêter à confusion. Le type de composant que vous avez utilisé est une petite bulle de plastique munie de deux fils sortant de sa base. Il s'agit d'une *LED standard*, une *LED traversante*, ou un *voyant à LED*, mais elles sont devenues tellement courantes qu'on les appelle simplement « LED ». Les diodes qui émettent de la lumière sont maintenant utilisées dans des milliers de composants, dont les afficheurs numériques insérés dans votre plaque de montage. On les appelle *afficheurs numériques*. Plus précisément, il s'agit d'un *afficheur 7 segments à un chiffre*.

Observez la figure 18-4. Deux broches sont marquées « masse négative », car elles sont reliées en interne, mais il suffit d'en relier une seule à la masse. Les broches de chaque côté sont reliées aux segments « a » à « g » formant les chiffres, et au point décimal identifié « dp ». (Certains fabricants l'identifient par la lettre « h ».)

Dans ce livre, j'ai choisi des afficheurs dont le boîtier mesure environ 12,7 mm × 19 mm (0,5" × 0,75"). Leurs broches sont en général disposées comme je l'indique. Les afficheurs plus petits ont des broches réparties autour de leur boîtier.

Les sept segments s'allument quand une tension positive leur est appliquée. Il s'agit d'un afficheur à *cathode commune*, car tous les pôles négatifs des diodes internes sont reliés ensemble. Souvenez-vous que le pôle positif d'une diode s'appelle l'anode, et le pôle négatif la cathode. Dans un afficheur à *anode commune*, la situation est inversée, les segments doivent recevoir une tension négative par rapport à l'anode commune pour s'allumer. Il faut utiliser le type d'afficheur qui correspond le mieux au circuit, mais les afficheurs à cathode commune sont probablement les plus courants. Le compteur 4026B ayant des sorties positives, il fonctionne donc parfaitement avec un afficheur à cathode commune.

Parfait, mais j'oubliais une information cruciale : comme les LED ; les segments d'un afficheur doivent être protégés par une résistance reliée en série. C'est un problème, d'ailleurs on pourrait se demander pourquoi les fabricants ne prévoient pas des résistances internes dans leurs puces. C'est parce que les afficheurs sont prévus pour fonctionner sous diverses tensions qui vont déterminer la valeur des résistances à utiliser.

Bien, mais pourquoi ne peut-on pas utiliser une seule résistance pour tous les segments ? En réalité, c'est possible. D'ailleurs, je l'ai fait dans votre circuit de démonstration. Sur la figure 18-3, il s'agit de R11 qui est reliée entre la broche de masse négative et le bus négatif de la plaque de montage. Cependant, cette résistance unique abaisse la tension et diminue l'intensité du courant, parfois pour 2 segments, ou pour 5, parfois pour les 7, selon le chiffre qui est affiché. En conséquence, certains chiffres apparaîtront plus lumineux que d'autres.

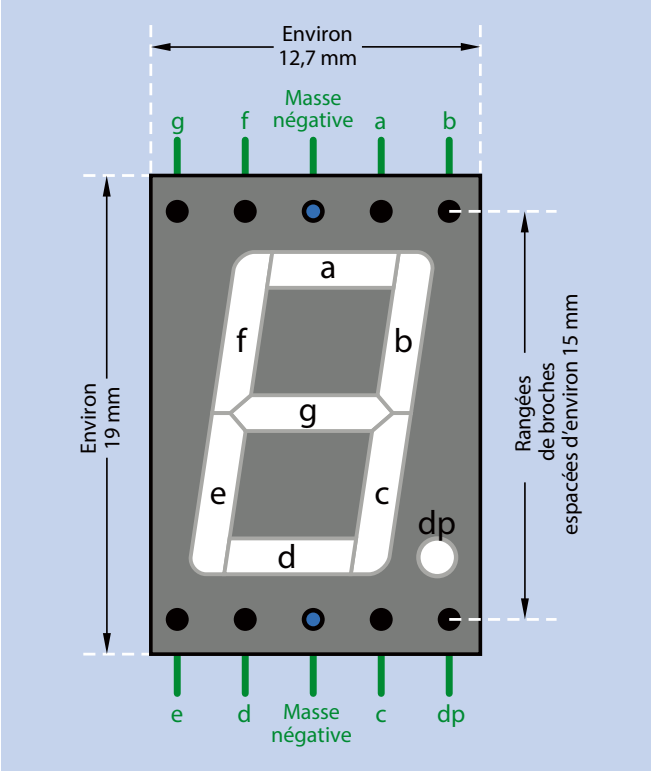


Figure 18-4. *Dimensions et brochage de l'afficheur LED à sept segments, choisi pour ce projet.*

Est-ce que cela est gênant ? Pour cette démonstration, j'ai privilégié la simplicité à la perfection, j'ai donc utilisé une seule résistance. Ce n'est pas ce qui est préconisé, mais vous devrez installer trois afficheurs, je pense que vous serez heureux de n'utiliser que trois résistances plutôt que 21.

Sur la figure 18-2, la valeur de la résistance de protection située près de l'afficheur est 1K. Cette valeur rend l'apparence des afficheurs un peu sombre, mais ils sont lisibles, et je ne veux pas surcharger les sorties du compteur. Si vous utilisez un afficheur LED à forte luminosité, il sera plus lumineux.

Technique : le compteur

La puce 4026B est un *compteur décimal (ou à décades)*, car elle compte par dizaines. La plupart des compteurs ont une *sortie codée*, c'est-à-dire que leurs sorties représentent les nombres en format binaire (je détaillerai ce point par la suite dans ce projet). Ce compteur ne se comporte pas ainsi, il possède sept sorties convenant à un afficheur à sept segments.

Alors que les autres compteurs nécessitent un circuit de pilotage qui convertit la sortie binaire en format correspondant à la configuration des sept segments, le 4026B fait le tout en une seule puce.

Certains fabricants indiquent que la puce peut fonctionner avec une alimentation comprise entre 3 V et 18 V CC, mais la fiche technique originale de Texas Instruments indique une valeur recommandée entre 5 V et 15 V, je pense que c'est plus raisonnable.

Le 4026B ne peut malheureusement pas fournir un courant de sortie important. La fiche technique recommande de ne pas dépasser 1 mA sous une tension de 9 V CC, selon mon expérience, une intensité de 5 mA est acceptable si le compteur ne fonctionne pas à une fréquence élevée. Le compteur interne consomme beaucoup d'énergie en hautes fréquences, ce qui génère de la chaleur. Je l'utiliserai à environ 1 kHz ce qui n'est pas « élevé » dans le monde digital. Le compteur est capable de fonctionner à une fréquence 1 000 fois supérieure.

Idéalement, il faudrait amplifier les sorties du compteur, d'ailleurs, il est possible de se procurer un circuit intégré

contenant 7 paires de transistors spécialement conçus pour cet usage. Il s'agit d'un *réseau Darlington*. (Si vous voulez également afficher le point décimal, pas de problème, il existe un autre circuit intégré contenant 8 paires de transistors.)

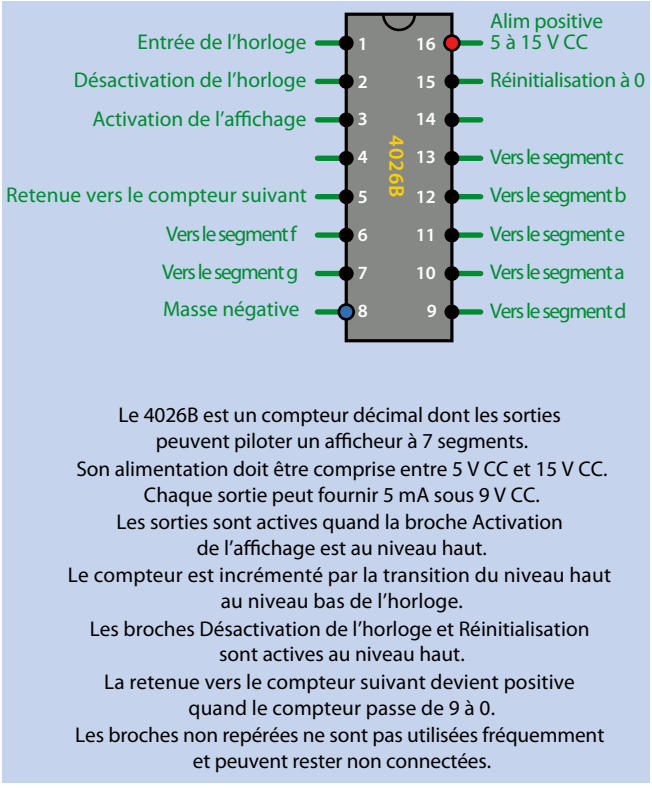


Figure 18-5. *Brochage du compteur 4026B.*

Si j'avais utilisé trois réseaux Darlington pour piloter les trois afficheurs LED de ce projet, ils auraient pu être très lumineux, mais cela aurait ajouté de la complexité et un coût supplémentaire, car j'aurais eu besoin de deux plaques de montage. (En raison de la façon dont les réseaux Darlington sont connectés en interne, j'aurais dû utiliser des afficheurs à anode commune au lieu de ceux à cathode commune.) Sachant tout cela, j'ai décidé de ne pas utiliser de réseaux Darlington.

Je vais maintenant vous fournir quelques détails sur le fonctionnement interne du 4026B. Revenez à la figure 18-5 qui décrit le brochage de la puce. Les broches marquées «vers le segment» sont faciles à imaginer. Il faut simplement relier chacune de ces broches à la broche du segment approprié de l'afficheur LED.

Les broches 8 et 16 sont respectivement la masse et l'alimentation positive. La puce ne fonctionnera pas si ces connexions sont absentes. Pratiquement tous les circuits intégrés digitaux ont besoin d'une alimentation reliée aux coins opposés de leur boîtier (à l'exception du temporisateur 555, qui est en fait classé dans les puces analogiques).

Les résistances de rappel et de tirage sont plus importantes pour les puces numériques CMOS qu'elles ne le sont pour le temporisateur 555 que vous utilisez. Une puce numérique doit absolument avoir un niveau haut ou bas à ses entrées, dans le cas contraire, il pourrait générer des résultats imprévisibles si vous ne respectez pas cette règle.

> *Si des broches de sortie ne sont pas utilisées, elles peuvent demeurer non connectées.*

Parfois, une broche d'entrée n'est pas utilisée. Le 4026B m'indique par exemple que la broche 3 permet d'activer l'affichage ? Si je souhaite que l'affichage soit permanent, dans mon circuit, je dois relier la broche 3 directement au bus positif pour pouvoir l'oublier.

> *Si vous n'utilisez pas une broche d'entrée, celle-ci doit avoir un niveau défini. Vous pouvez la relier directement au bus positif ou négatif de l'alimentation.*

Examinons maintenant les autres fonctionnalités du 4026B.

L'entrée de l'horloge (broche 1) accepte un train d'impulsions hautes et basses. La puce ne se soucie pas de la durée des impulsions, il répond en ajoutant 1 à son compteur, chaque fois qu'il détecte une transition de sa tension d'entrée du niveau bas au niveau haut. Il répond au *flanc montant* de chaque impulsion.

Désactivation de l'horloge (broche 2), demande au compteur d'ignorer l'entrée de l'horloge. Comme toutes les entrées de cette puce, elle est active au *niveau haut*, ce qui signifie qu'elle remplit sa fonction quand son niveau est haut. Sur votre plaque de montage, j'ai prévu temporairement un fil bleu pour maintenir la broche 2 au niveau bas. En d'autres termes, j'ai désactivé la broche de

désactivation de l'horloge. Comme c'est confus, je résume la situation :

- Quand la broche de désactivation de l'horloge est au niveau haut, le compteur ignore les impulsions qu'il reçoit sur la broche 1.
- Quand la broche de désactivation de l'horloge est maintenue au niveau bas par une résistance de rappel, elle permet au compteur de compter les impulsions.

La broche 4, nommée **Sortie du signal d'activation de l'affichage** par les fabricants est sans intérêt dans notre cas, je ne l'ai pas identifiée.

Retenue (broche 5) est essentielle si vous voulez compter au-delà de la valeur 9. L'état de cette broche change quand le compteur passe de la valeur 9 à la valeur 0. Si vous reliez cette broche à l'entrée de l'horloge d'un second compteur 4026B, celui-ci comptera les dizaines. Vous pouvez alors utiliser sa broche de retenue pour la relier à un troisième compteur qui comptera les centaines. Je vais d'ailleurs utiliser cette possibilité par la suite.

La broche 14 peut être utilisée pour relancer le compteur quand il doit compter de 0 à 2. C'est utile pour le chiffre des heures d'une horloge de 24 heures ce qui ne concerne pas notre projet. Puisqu'il s'agit d'une broche de sortie, je peux la laisser non connectée.

Toutes ces possibilités vous paraissent peut-être confuses, mais si vous avez déjà étudié un compteur, vous les comprendrez (si vous êtes méthodique et patient), en consultant les fiches techniques des fabricants.

Vous pouvez également les vérifier en utilisant des LED et des boutons-poussoirs, afin d'être sûr de votre compréhension. En fait, c'est ainsi, il y a longtemps, que j'ai fait connaissance avec le 4026B.

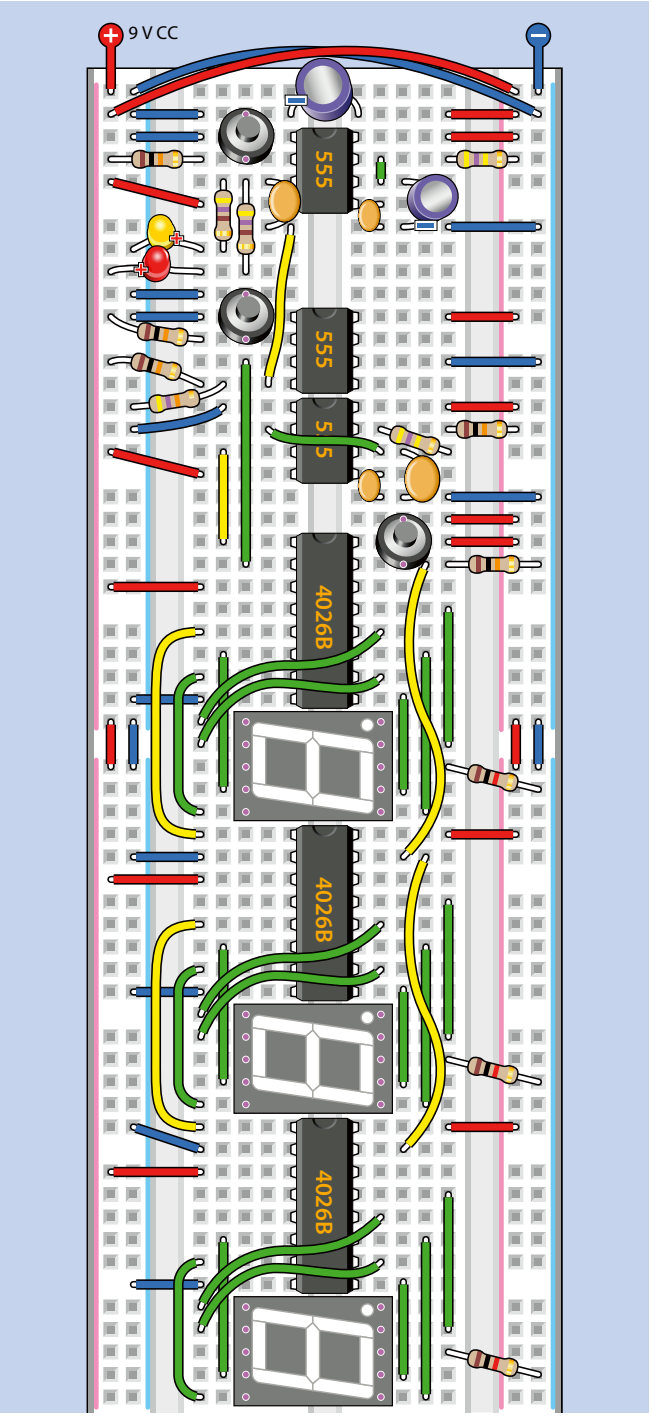


Figure 18-6. *Circuit complet du testeur de réflexes.*

Description fonctionnelle

Comment doit fonctionner le testeur de réflexes ? Voici ce que je souhaite :

1. J'ai besoin d'un bouton de départ.

2. Après avoir appuyé sur le bouton de départ, il y a un délai durant lequel rien ne se passe. Brusquement, un signal lumineux avertit le joueur qu'il peut répondre.

3. Pendant ce temps, le comptage partant de 000 s'incrémente toutes les millisecondes (il y a 1 000 millisecondes dans une seconde).

4. Le joueur doit appuyer sur le bouton pour stopper le comptage.

5. Le compteur reste figé, indiquant le temps qui s'est écoulé entre l'avertissement lumineux et l'arrêt du comptage. Ceci mesure la rapidité des réflexes du joueur. Simple, n'est-ce pas !

6. Un bouton de réinitialisation remet le compteur à 000.

Circuit complet

Le plan complet du circuit répondant à mes souhaits pour le testeur de réflexes est représenté sur la figure 18-2. Il utilise des temporisateurs 555 de façon identique au système d'alarme anti-intrusion, cependant leur fonctionnement doit être compatible avec les puces de comptage, ce qui augmente la complexité. Avant de câbler ce circuit, n'oubliez pas de retirer le fil de pontage temporaire bleu qui existait sur la figure 18-2.

Les valeurs des composants sont indiquées sur la figure 18-7. Vous devez ajouter les trois compteurs qui ne sont pas représentés sur cette illustration, ainsi que les trois afficheurs et une résistance de 1K en série pour chacun d'entre eux. Je n'ai pas pris la peine de les montrer, car vous pouvez les voir sur la figure18-6.

Après avoir testé le circuit, je vais vous montrer comment augmenter la vitesse et effectuer une calibration afin de fournir une mesure du temps relativement précise. Pour cela, trois composants additionnels représentés sur la figure 18-7, sous l'en-tête « amélioration », sont nécessaires. Tous les composants nécessaires sont indiqués au pied de la figure 18-7.

Je vais décrire le fonctionnement de ce circuit en utilisant les repères des composants de la figure 18-8. Quand vous mettez le circuit sous-tension, en supposant que vous n'avez commis aucune erreur de câblage, le compteur doit démarrer immédiatement sans que vous le lui demandiez. Appuyez sur le bouton « Stop » pour faire cesser le comptage.

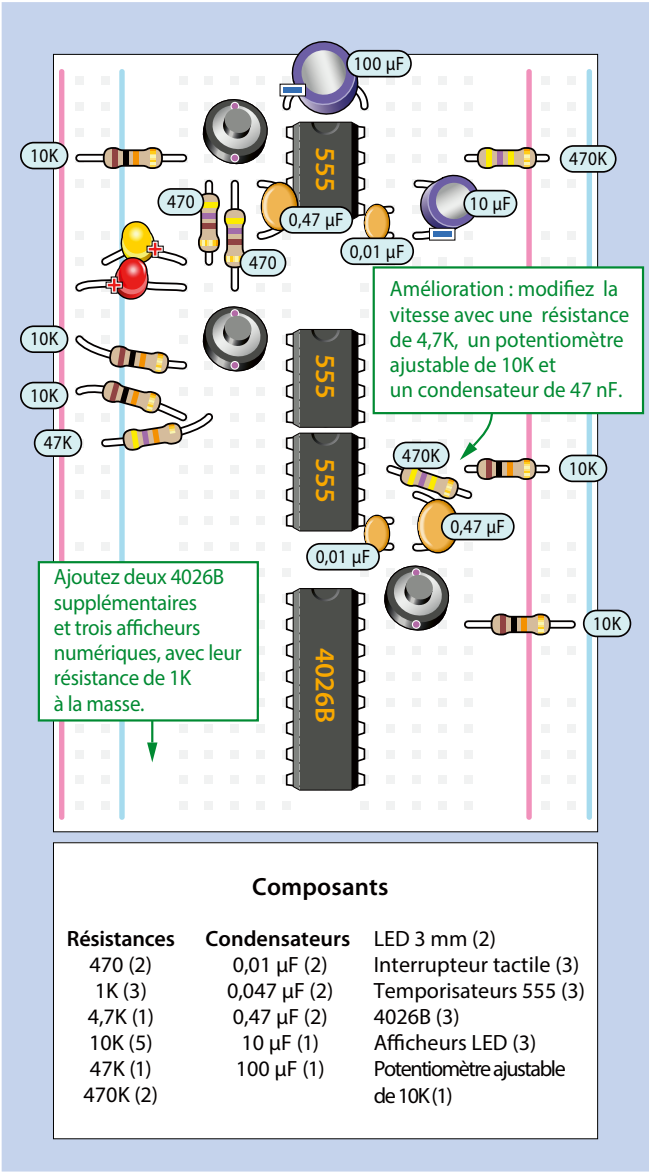


Figure 18-7. *Plan du testeur de réflexes limité aux composants.*

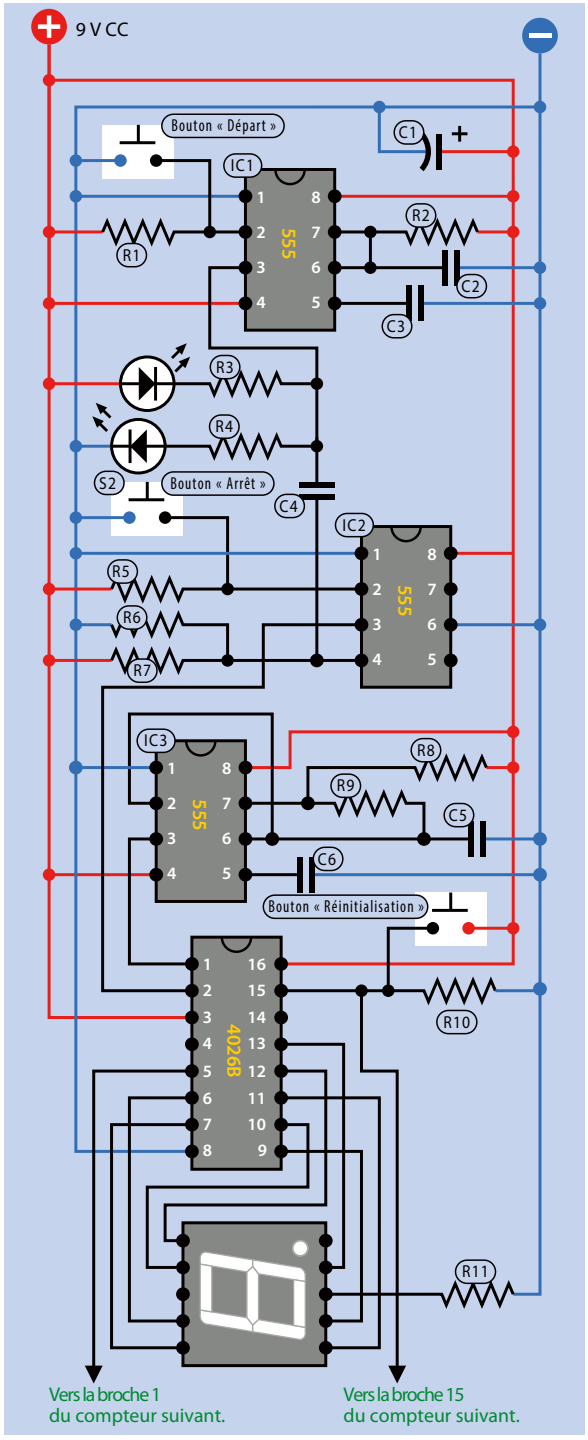


Figure 18-8. *Schéma intégral du testeur de réflexes.*

Appuyez sur le bouton de Réinitialisation pour remettre le compteur à zéro. Vous êtes prêt pour l'action.

Appuyez sur le bouton Départ, Un délai initial débute. Durant ce délai, la première LED est allumée. Le délai dure environ 7 secondes, après quoi la LED s'éteint et la seconde LED s'allume pour vous signaler qu'il faut appuyer sur le bouton d'arrêt le plus rapidement possible. Le compteur s'arrête et conserve la valeur du temps qu'il vous a fallu pour répondre. Vous pouvez alors appuyer sur le bouton de réinitialisation et recommencer.

IC3 fonctionnant lentement, vous n'aurez pas trop de difficultés à arrêter le compteur avant qu'il n'atteigne une valeur élevée. Je vous suggère de le laisser fonctionner un peu plus afin de vérifier que les trois chiffres s'affichent correctement. Vous devez également vérifier que le deuxième chiffre passe de zéro à 1 quand le premier compteur passe de 0 à 9. Il vous faut également vérifier que le troisième chiffre se comporte de façon identique.

Voyons maintenant comment cela fonctionne.

Sur la figure 18-9, vous pouvez voir les interactions entre les compteurs, les boutons et les temporisateurs. Pour une compréhension plus facile, commencez par la partie inférieure de ce diagramme et continuez vers le haut.

IC3, situé en bas fonctionne en permanence en mode astable. Il ne s'arrête jamais, sa sortie est reliée à la broche 1 du premier compteur.

Le bouton de réinitialisation est très simple, vous l'avez déjà utilisé. Il indique simplement au compteur de remettre sa valeur à 0.

Sur la figure 18-6, vous pouvez observer que la broche 15 du premier compteur est reliée à la broche 15 du second compteur par un long fil de pontage jaune, et un autre fil de pontage jaune est relié au troisième compteur, ainsi, quand vous remettez à zéro le premier compteur, les trois sont remis à zéro.

Le comptage est contrôlé par IC2 qui est un temporisateur 555 configuré en mode bistable. Sa sortie est connectée à la broche 2 du premier compteur. Rappelez-vous que la broche 2 du compteur est la broche de désactivation de son horloge. Un niveau haut sur cette broche prescript au compteur d'ignorer les impulsions arrivant sur sa broche 1. Un niveau bas lui permet de les compter.

Quand vous appuyez sur le bouton d'arrêt, il fournit une impulsion de niveau bas à la gâchette d'IC2, qui met sa sortie au niveau haut, et empêche le compteur de compter les impulsions qu'il reçoit.

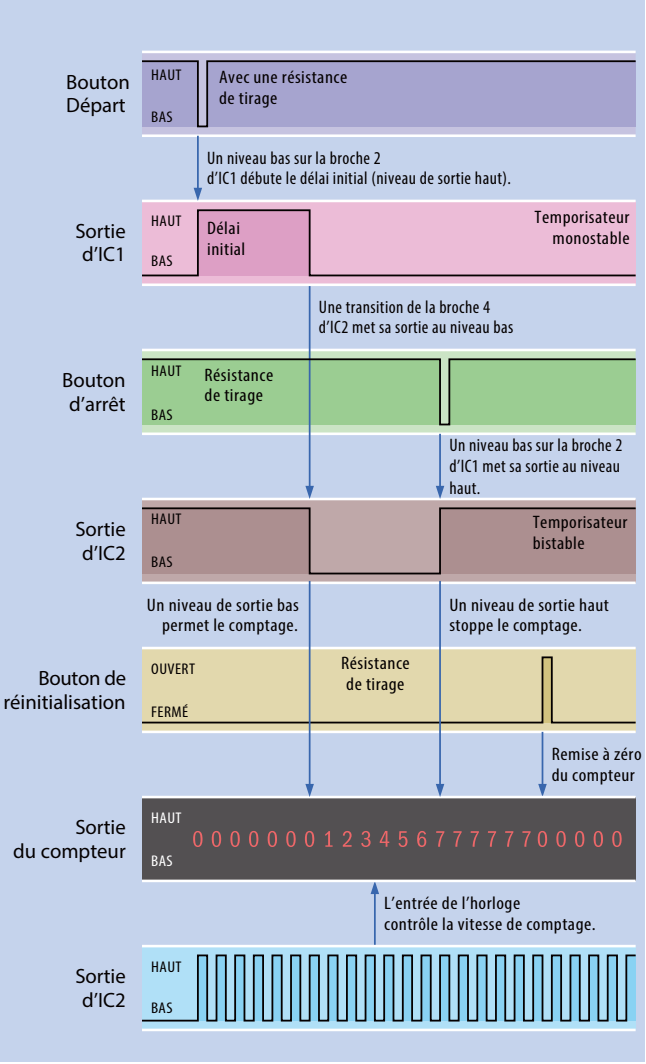


Figure 18-9. *Interactions entre les compteurs, les boutons les temporisateurs dans le circuit du testeur de réflexes.*

Quand IC2 reçoit une impulsion basse sur sa broche 4 (la broche de réinitialisation), sa sortie passe au niveau bas, ce qui prescrit au compteur de reprendre le comptage des impulsions.

Comment la broche 4 d'IC2 reçoit-elle les impulsions ? Par IC1, le temporisateur qui génère la période d'attente initiale. À la fin de ce délai, sa sortie passe au niveau bas, cette transition traverse le condensateur de couplage relié à la broche 4 d'IC2.

La séquence complète commence quand vous appuyez sur le bouton de départ qui déclenche la sortie haute d'IC1. La fin de cette impulsion de sortie transmet une impulsion négative à IC2, mettant sa sortie au niveau bas. La sortie basse permet au compteur de commencer à compter.

La difficulté, dans la conception de ce circuit, se situait au niveau de la communication entre les temporisateurs 555 et les compteurs 4026B. Tous les circuits intégrés étaient satisfaits, mais ils ne parlent pas le même langage. Dans l'univers des temporisateurs 555, une entrée basse sur la broche 2, déclenche une sortie haute sur la broche 3, qui est souvent utilisée pour indiquer à un autre composant de débuter une action. Alors qu'un compteur 4026B pense qu'une entrée de niveau haut (sur sa broche 2), signifie qu'il doit ***cesser*** de compter. En conséquence, j'ai dû vérifier si IC2 pouvait accepter un niveau de sortie haut la plupart du temps, et la mettre au niveau bas pour indiquer au compteur de commencer à compter.

Pour cela, il me fallait déclencher IC2 en envoyant une impulsion sur sa broche de réinitialisation, ce qui posait problème. Le comportement de la gâchette d'un temporisateur 555 est facile à prévoir : si son niveau devient inférieur à un tiers de la tension d'alimentation, cela déclenche le temporisateur. La broche de réinitialisation exige une tension inférieure pour arrêter le temporisateur. Inférieure de combien ? Cela semble dépendre du fabricant. La valeur exacte de cette tension n'est pas précisée dans les fiches techniques que j'ai consultées.

Sur le schéma de la figure 18-8, vous pouvez voir deux résistances, R6 et R7, qui sont reliées à la broche de réinitialisation de IC2. R6 vaut 10K, alors que R7 vaut 47K. Ces résistances forment un diviseur de tension, qui diminue légèrement la tension sur la broche 4, ainsi, quand une impulsion lui parvient via C4, la tension de la broche 4 descendra au niveau zéro. Toute valeur supérieure à zéro ne satisfera pas IC2.

Si vous avez un quelconque problème pour obtenir le démarrage du compteur par IC2, diminuez légèrement la valeur de R7.

J'ai préconisé des LED de 3 mm pour ce circuit parce qu'il ne leur reste pas beaucoup de place. Vous pouvez utiliser des LED de 5 mm si vous arrivez à les placer. J'ai également suggéré qu'elles soient de couleurs différentes, car l'une vous demande de vous « préparer », l'autre « d'agir ».

Sur la figure 18-8, vous pouvez voir que les deux LED sont orientées en sens contraire, pour que la première évacue du courant dans IC1 quand sa sortie est au niveau bas, et la seconde s'allume quand le niveau d'IC1 est haut. Je ne vous ai pas précisé auparavant, que l'on pouvait puiser du courant à la sortie (broche 3) d'un temporisateur, mais en fait, il n'y a aucun problème à écouler du courant quand sa sortie est au niveau bas.

L'autre particularité que je dois vous expliquer concerne C1, le condensateur de 100 µF situé en haut du circuit. Sur la figure 18-6, il paraît avoir été ajouté après coup, mais en fait il est très important. Il supprime les pics de tension créés par les temporisateurs 555 quand ils activent leur sortie au niveau haut. En ce cas, ne devrait-il pas être plus proche des temporisateurs ? Non, car ces pics néfastes traversent entièrement le circuit, et C1 s'en accommode à l'endroit où il est placé. Ceci met fin à mes explications.

Calibration

Rappelez-vous que la vitesse du compteur est contrôlée par IC3, le temporisateur situé le plus en bas de la plaque de montage. R8, R9, et C5 déterminent la fréquence.

R8 vaut 10K, et comme vous le savez, je préfère ne pas utiliser une valeur plus petite. R9 vaut 470K, sa valeur peut être nettement plus petite. C5 vaut 0,47 µF, cette valeur peut également être diminuée. Commençons par remplacer C5 par un condensateur de 47 nF. Cela va multiplier la vitesse de fonctionnement par un facteur de 10. Si vous utilisez une valeur de 10K pour R9, le tableau de la figure 16-5 indique que vous devriez obtenir une fréquence d'environ 1 kHz, ce qui est ce que nous voulons, rappelez-vous que cela signifie que le temporisateur va délivrer 1000 impulsions par seconde.

Ce n'est pas une valeur précise, il va être nécessaire de pouvoir l'ajuster avec précision, il va vous falloir un potentiomètre ajustable pour le faire.

Par chance, j'ai laissé un peu de place sur la plaque de montage, suffisamment pour un potentiomètre ajustable de 10K. La figure 18-10 vous montre comment il peut être placé.

Avant d'installer le potentiomètre ajustable, retirez R9, la résistance de 470K qui était utilisée, remplacez-la par une résistance de 4,7K, selon la figure 18-10. Je pense que les fils d'une résistance sont assez longs pour permettre de réaliser directement cette liaison.

Si vous réglez le potentiomètre ajustable à mi-course, sa valeur sera d'environ 5K, ajoutée aux 4,7K de la résistance, le total est proche de 10K.

N'oubliez pas qu'il vous faut également remplacer C5 par un condensateur de 47 nF.

Si maintenant vous activez le circuit, l'afficheur du haut comptera les millièmes de seconde, l'afficher central comptera les centièmes de secondes, et l'afficheur inférieur, approximativement les dixièmes de seconde.

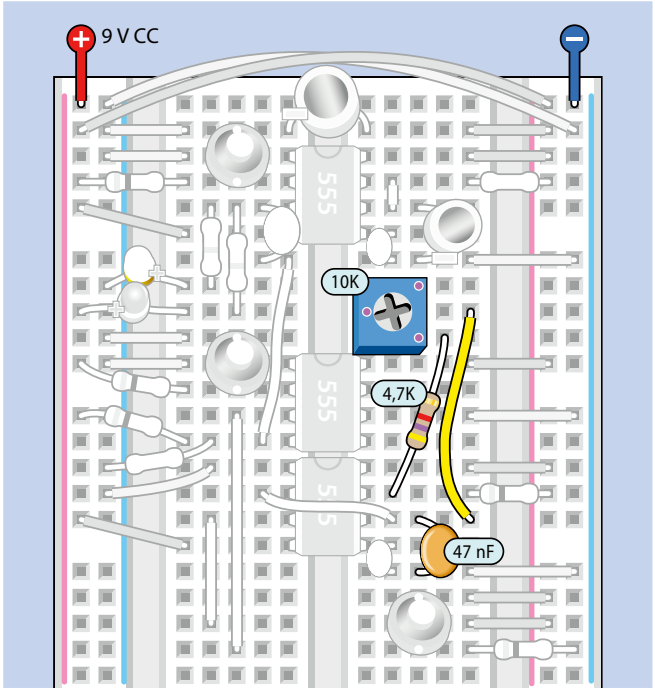


Figure 18-10. *Ajout d'un potentiomètre ajustable pour régler la vitesse de comptage.*

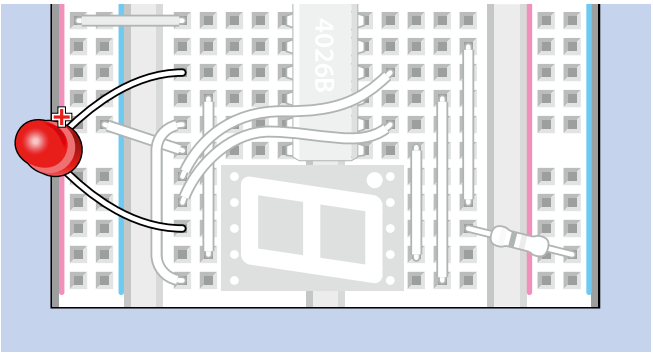


Figure 18-11. *Ajout d'une LED pour faciliter la calibration.*

La « calibration » consiste à ajuster le circuit afin que sa vitesse corresponde à une source précise de temps. Par chance, il y a de nombreux dispositifs délivrant un temps précis, comme par exemple le chronomètre de votre smartphone, mais comment allez-vous le faire correspondre au clignotement de l'afficheur inférieur ?

Voici ce que je vous suggère.

Sur le compteur du bas, la broche 5 est la « retenue ». Elle devient haute à chaque fois que le compteur repasse à zéro. Autrement dit, alors que ce compteur compte les dixièmes de seconde, la broche 5 ne change qu'une fois par seconde. Ah ah !

La figure 18-11 vous montre comment insérer une LED entre la broche 5 du compteur du bas, et la broche centrale de l'afficheur inférieur. Rappelez-vous que la broche centrale à gauche de l'afficheur est reliée en interne à la broche centrale de l'autre rangée, qui est reliée à une résistance de protection de 1K. Si vous insérez une LED comme le montre la figure 18-11, elle ne surchargera pas le compteur et elle clignotera toutes les secondes. (En réalité, elle clignotera légèrement durant le comptage, en raison du changement de la charge du compteur, mais vous verrez suffisamment clairement son clignotement.)

Il ne vous reste plus qu'à placer votre chronomètre à proximité de la LED. Démarrez le testeur de réflexes, et laissez-le fonctionner. En usant de patience et d'attention, ajustez le potentiomètre ajustable, afin de synchroniser le clignotement de la LED avec le chronomètre.

Fondamentaux : les réflexes humains

En mesurant vos réflexes, vous les trouvez, peut-être, un peu trop longs ?

En fait, les réflexes humains sont lents, notamment en comparaison avec la rapidité des circuits électroniques. Le temps de réaction typique à une stimulation visuelle est d'environ 250 millisecondes, c'est-à-dire un quart de seconde. Comment les humains peuvent-ils conduire une voiture de course, ou piloter un avion, alors qu'il leur faut un tel délai pour réagir à un évènement ? Je ne sais pas mais c'est ainsi !

Après avoir calibré le circuit de votre testeur de réflexe, si vous obtenez une valeur de 200 ms ou moins, vous êtes vraiment performant.

Les réflexes sont affectés par de nombreux facteurs, incluant la consommation d'alcool ou de stupéfiants. Il reste une chose que je dois vous demander, c'est de ne pas utiliser le testeur de réflexes pour savoir si vous êtes assez sobre pour pouvoir conduire. La capacité à conduire dépend de la capacité de jugement aussi bien que des réflexes, qui sont perturbés par la consommation d'alcool. Le testeur de réflexes est uniquement destiné au divertissement.

Expérience 19
Apprenons la logique

Un compteur, comme le 4026B est techniquement une *puce logique*. Il contient des portes logiques qui lui permettent de réaliser un comptage. Chaque ordinateur utilise des *portes logiques* pour réaliser ses fonctionnalités fondamentales.

La logique est si fondamentale, que je vais me plonger en détail dans cette technique. Les mots magiques ET, OU, NON-ET, NON-OU, OU EXCLUSIF et NON-OU EXCLUSIF, (AND, OR, NAND, NOR, XOR, et XNOR) vont nous conduire vers le monde intriguant de la logique numérique.

Quand vous utilisez des portes logiques individuellement, il est extrêmement facile de comprendre leur comportement. Quand vous les combinez entre elles, cela devient plus délicat. Ayant cela en tête, je vais les utiliser une par une. Si elles vous paraissent trop simples, soyez patient, je vous garantis que ça va devenir beaucoup plus complexe.

Ce chapitre contient beaucoup d'explications et de résumés factuels. Je n'imagine pas que vous puissiez assimiler tout en détail, l'idée est de vous fournir les éléments vers lesquels vous pourrez revenir pour rafraîchir votre mémoire. Vous pourriez réaliser les projets des expériences 20 à 23 sans comprendre parfaitement le fonctionnement des portes logiques, mais si vous souhaitez savoir comment ils fonctionnent, revenez à ce chapitre de référence.

Vous aurez besoin de :

- 1 plaque d'essais, des fils de liaison, une pince coupante, une pince à dénuder, des fils de tests, un multimètre
- 1 source d'alimentation de 9 V CC (pile ou adaptateur secteur)
- 2 interrupteurs tactiles
- 1 circuit intégré quadruple OU à deux entrées 74 HC32
- 1 circuit intégré quadruple ET à deux entrées 74 HC08
- 1 LED générique
- 1 régulateur de tension LM7805
- résistances : 1K (1), 10K (2)
- condensateurs : 0,1 µF (1), 0,47 µF (1)

Technique : le régulateur de tension

Les circuits intégrés dont les références commencent par 74 consomment davantage que le temporisateur 555 ou le compteur 4026B que vous avez déjà utilisés. La plupart nécessitent une tension précise de 5 V CC, sans fluctuations, ni pics parasites.

Heureusement, cela peut se faire facilement et de façon économique, en ajoutant un régulateur de tension LM7805 à votre plaque de montage. Quand on l'alimente par une tension comprise entre 7,5 et 12 V CC, il fournit en sortie une tension stabilisée de 5 V CC de façon fiable.

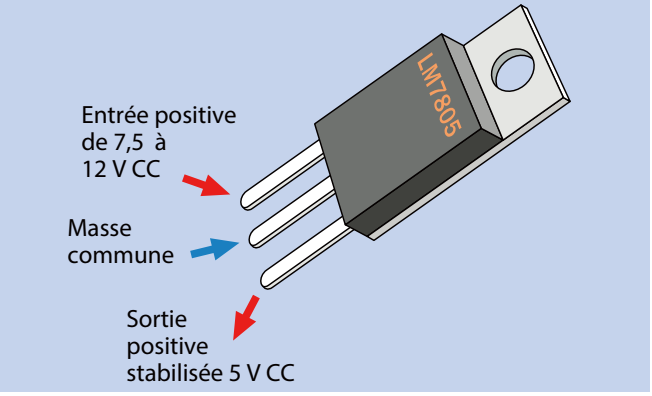


Figure 19-1. *Le régulateur de tension LM7805.*

Le régulateur est représenté sur la figure 19-1. Il est différent des autres composants que vous avez déjà utilisés, car il peut fournir un courant pouvant atteindre 1,5 A. Le dos de son boitier, en aluminium, absorbe la chaleur. Le trou en haut permet de le visser fermement sur un radiateur de plus grande taille. Dans notre cas, ce n'est pas important, car les circuits logiques avec lesquels je vais utiliser ce régulateur absorbent une faible intensité. Vous pouvez l'installer simplement, en l'insérant dans votre plaque de montage. Les broches plates sont un peu difficiles à insérer, mais avec un peu d'insistance, elles pourront être enfoncées.

La représentation graphique que je vais utiliser pour ce régulateur dans les plans des plaques de montage est montrée sur la figure 19-2, au-dessus de son symbole schématique. Dans les schémas issus d'autres publications, ce composant est habituellement représenté par un rectangle dans lequel est inscrit la référence.

Je vais continuer à utiliser une source d'alimentation de 9 V CC, afin que vous ne soyez pas obligé d'acheter une alimentation de 5 V CC. Vous devrez placer ce régulateur en haut de votre plaque de montage, accompagné de ses deux condensateurs de filtrage, qui sont indispensables. La sortie du régulateur sera reliée aux bus positifs de la plaque de montage, comme le montre la figure 19-3. Le schéma correspondant à cette configuration est présent sur la figure 19-4.

Notez que le pôle négatif de la source d'alimentation de 9 V CC et la broche négative (masse) du régulateur se partagent le même bus négatif.

Prenez garde à ne jamais alimenter directement les circuits intégrés de la série 74xx que vous utilisez par la tension de 9 V CC. Ils pourraient ne pas y survivre. Dans les plans de la plaque de montage, je placerai le régulateur de tension chaque fois qu'il sera nécessaire. Dans les schémas, le régulateur n'apparaitra pas, mais le bus d'alimentation sera identifié par la valeur de la tension qu'il véhicule.

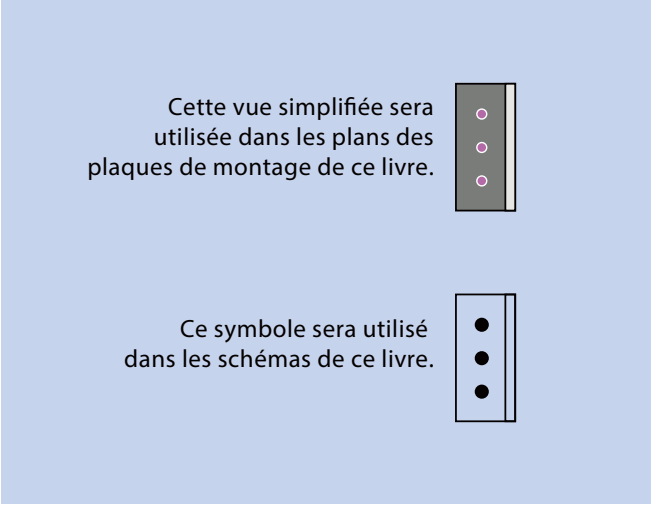


Figure 19-2. *Représentation du circuit intégré LM7805 dans ce livre.*

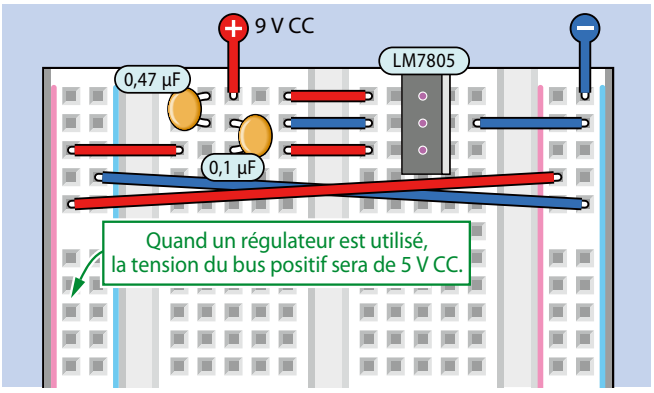


Figure 19-3. *Localisation d'un régulateur de tension en partie supérieure d'une plaque de montage. N'oubliez pas les condensateurs de filtrage.*

Je placerai des points noirs sur les fils rouges, pour vous rappeler qu'ils fournissent une tension de 5 V CC, et non 9 V CC.

Dans les schémas, un fil rouge marqué de points noirs délivre une tension de 5 V CC.

Attention : erreurs d'alimentation

CC, pas CA. Rappelez-vous que le LM7805 est un convertisseur de tension CC à CC. Ne pas le confondre avec un adaptateur CA qui utilise la tension alternative d'une prise murale de votre local. Ne jamais alimenter votre LM7805 par une tension alternative CA.

Intensité maximale. Le LM7805 remplit son rôle à la perfection, en maintenant sa tension de sortie à une valeur constante, quel que soit le courant qu'il délivre, à condition de respecter ses limites. Je suggère que l'intensité maximale fournie soit de 1 A, si le régulateur est utilisé sans radiateur.

Tension maximale. Le régulateur de tension est un circuit à semi-conducteurs. Il se comporte comme une résistance qui émet de la chaleur en réduisant la tension. Plus la tension d'entrée est élevée, et plus le courant absorbé est important, plus la quantité de chaleur à évacuer sera importante. C'est pour cette raison que je conseille une tension d'entrée limitée à 12 V CC.

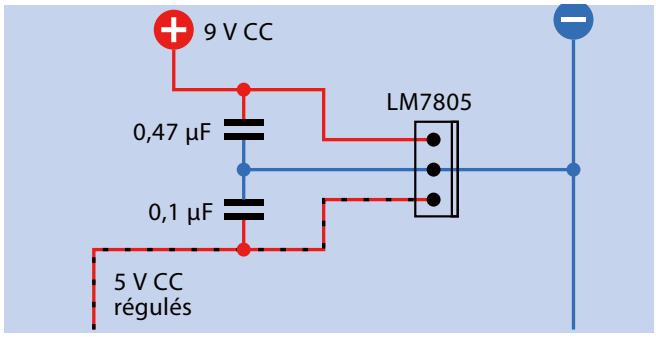


Figure 19-4. *Schéma de la plaque de montage de la figure 19-3. L'alimentation 5 V CC est véhiculée par le fil rouge à points noirs.*

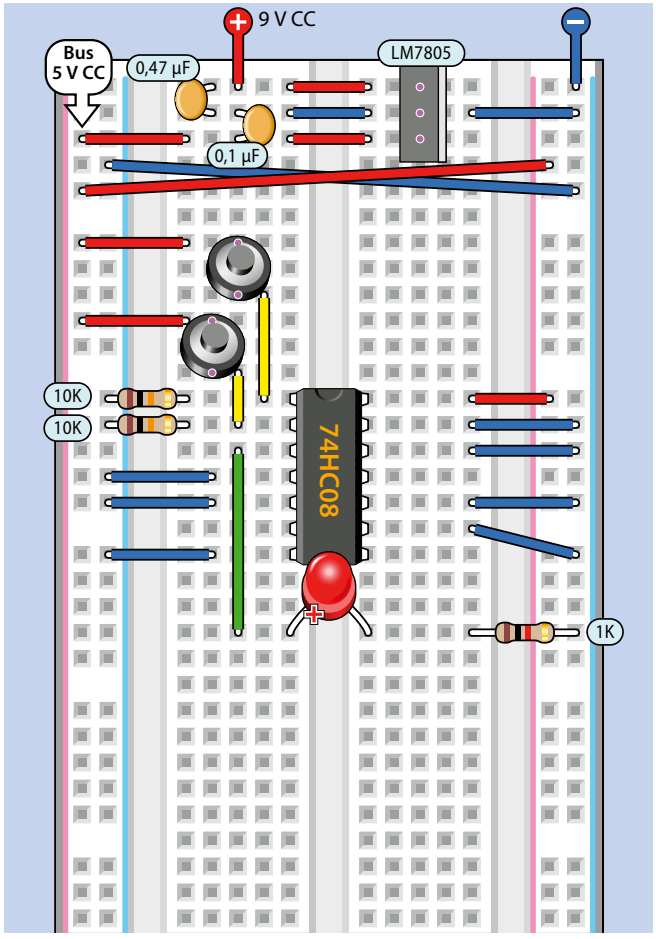


Figure 19-5. *Circuit de démonstration de votre premier circuit intégré logique.*

Tension minimale. Comme tous les composants à semi-conducteurs, le régulateur délivre une tension de sortie inférieure à sa tension d'entrée. C'est pour cela que je recommande une tension d'entrée de 7,5 V CC minimum.

Après avoir installé le régulateur de tension, réglez votre multimètre pour la mesure des tensions continues et mesurez la tension présente entre le bus positif et le bus négatif de la plaque de montage, de façon à être rassuré. Notez que les condensateurs de filtrage suppriment les oscillations parasites du régulateur du LM7805.

Votre première porte logique

Maintenant que votre plaque de montage alimentée en 5 V CC est prête, prenez deux interrupteurs tactiles, deux résistances de 10K, une LED et une résistance de 1K, et placez-les autour d'une puce logique 74 HC08, comme le montre la figure 19-5.

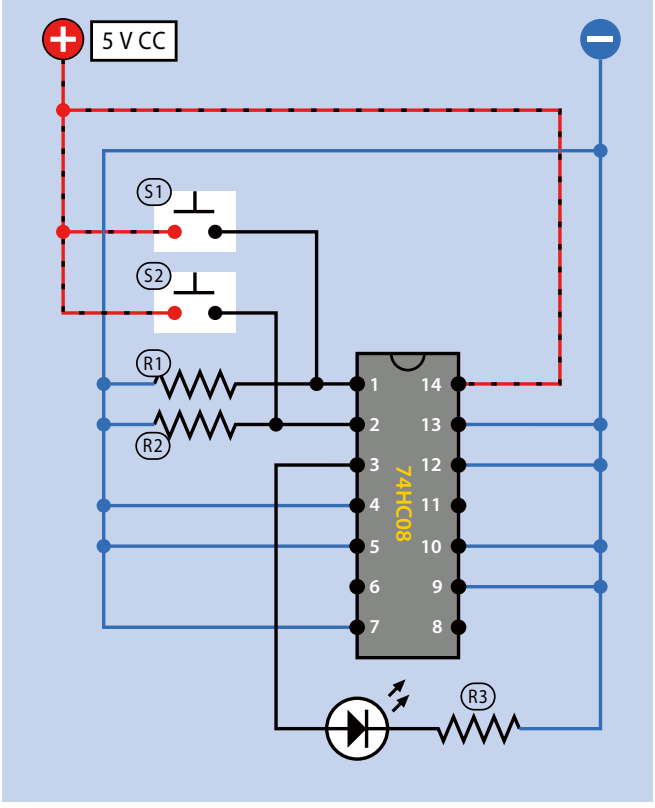


Figure 19-6. *Schéma du circuit de la figure 19-5.*

L'intensité délivrée par les circuits intégrés logiques étant limitée, il vous faut utiliser une résistance de 1K en série avec la LED, même si la tension d'alimentation est seulement de 5 V CC. La LED brillera faiblement, mais vous ne devriez avoir aucune difficulté à l'observer. Le schéma de ce circuit est représenté sur la figure 19-6.

Vous pouvez remarquer que de nombreuses broches de la puce sont reliées à la masse de l'alimentation. Cela tient au fait qu'il y a des broches inutilisées, j'en expliquerai les raisons un peu plus tard.

Quand vous mettez le circuit sous tension, rien ne se passe. Appuyez sur l'un des boutons-poussoirs, rien ne se passe. Appuyez sur l'autre interrupteur tactile, rien ne se passe non plus. Appuyez maintenant sur les deux interrupteurs simultanément, la LED devrait s'allumer.

Les broches 1 et 2 du 74 HC08 sont des *entrées logiques*. Les résistances de rappel de 10K R1 et R2, présentes dans le schéma, maintiennent les broches au niveau bas, jusqu'à ce que les boutons-poussoirs les portent au niveau haut, comme vous aviez l'habitude de le faire avec les temporisateurs 555. Dans ce cas, toutefois, la terminologie est quelque peu différente :

- Quand la tension d'une entrée ou d'une sortie est proche de 0 V CC, on dit qu'elle est au *niveau logique bas*. Cela signifie « inférieure à 1 V » pour la famille HC des circuits intégrés 74xx.
- Quand la tension d'une entrée ou d'une sortie est proche de 5 V CC, on dit qu'elle est au *niveau logique haut*.

Les deux entrées logiques sont reliées à une *porte logique* à l'intérieur du 74 hc08. Une porte est un ensemble de transistors qui interprètent des entrées hautes ou basses, et délivrent une sortie.

La porte que vous étudiez est une porte ET (AND), qui ne délivre un niveau HAUT par sa broche 3 que si ses deux entrées, broche 1 ET broche 2, sont au niveau logique HAUT.

Retirez le circuit intégré 74 HC08 de votre plaque de montage, en prenant soin de ne pas plier ses broches. Pour cela, vous pouvez glisser un tournevis fin sous son boitier au niveau de la séparation centrale de la plaque de montage. C'est un moyen efficace pour le soulever. Remplacez-le par une puce 74 HC32, exactement à la même position que celle où était inséré la puce 74 HC08, en ne modifiant pas la disposition des autres composants et des fils de pontage. Vous constaterez que si la broche 1, OU la broche 2 est au niveau logique HAUT, OU que ces deux entrées sont au niveau HAUT, la sortie est au niveau logique HAUT.

Cela peut vous sembler évident, mais tous les traitements logiques sont effectués par des portes logiques, il n'en existe que sept types différents. Vous venez de voir le comportement de deux d'entre elles. Pour cette expérience, vous pouvez évidemment utiliser de bons vieux interrupteurs pour obtenir le même résultat, mais vous verrez par la suite que les portes logiques peuvent faire beaucoup plus.

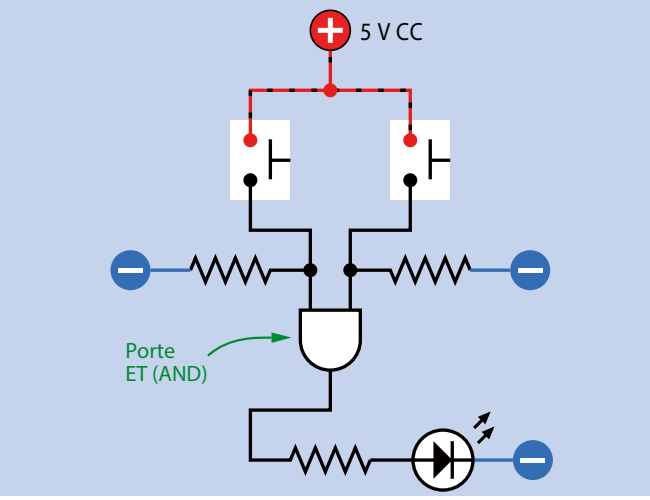


Figure 19-7. *Diagramme logique montrant une porte ET (AND).*

Technique : les symboles logiques

Les portes logiques peuvent être représentées par des symboles spéciaux dans des schémas particuliers appelés *diagrammes logiques*. Le diagramme logique du circuit que vous venez de réaliser avec la porte ET (AND), est représenté sur la figure 19-7.

Un diagramme logique ne montre aucune tension d'alimentation pour la porte, mais le circuit intégré contenant les portes ET doit être alimenté par les broches 7 (masse négative) et 14 (pôle positif). C'est ainsi que chaque porte logique fonctionne pour délivrer en sortie un courant supérieur à celui qu'elle absorbe en entrée.

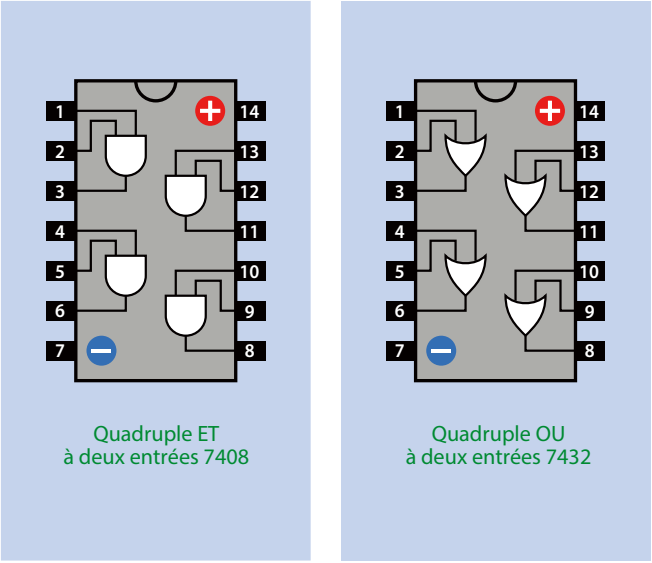


Figure 19-8. *Brochage d'une puce ET (à gauche), et d'une puce OU (à droite).*

> *Chaque fois que vous voyez une porte logique, n'oubliez pas qu'elle doit être alimentée pour fonctionner.*

La puce 74 HC08 contient quatre portes ET distinctes, comportant chacune deux entrée logiques et une sortie. Elle est appelée « quadruple porte ET à deux entrées ».

Les portes ET sont reliées aux broches de la puce, selon le diagramme de gauche de la figure 19-8. Du fait que vous n'aviez besoin que d'une porte pour le test simple que vous venez de réaliser, les broches d'entrée des autres portes étaient reliées à la masse, afin de les empêcher d'être flottantes. Les entrées de ces circuits intégrés sont si sensibles qu'elles peuvent répondre à des champs électromagnétiques et doivent toujours être reliées au pôle négatif de l'alimentation (masse), quand elles ne sont pas utilisées.

Comme vous avez pu le constater, la plupart des circuits logiques à deux entrées de la série 74xx (mais pas tous), ont des brochages identiques.

Vous vous demandez probablement comment un circuit aussi simple peut être aussi utile. En fait, vous verrez rapidement que les portes logiques peuvent créer un verrou à combinaison, ou une paire de dés électroniques, ou la version électronique d'un quiz télévisé où les joueurs s'affrontent pour être le premier à appuyer sur un bouton. Si vous êtes sacrément ambitieux, vous pourriez réaliser un ordinateur complet en utilisant des puces de la série 74xx. Bill Buzbee, un amateur hobbyiste l'a fait, vous pouvez voir sa réalisation sur la figure 19-9.

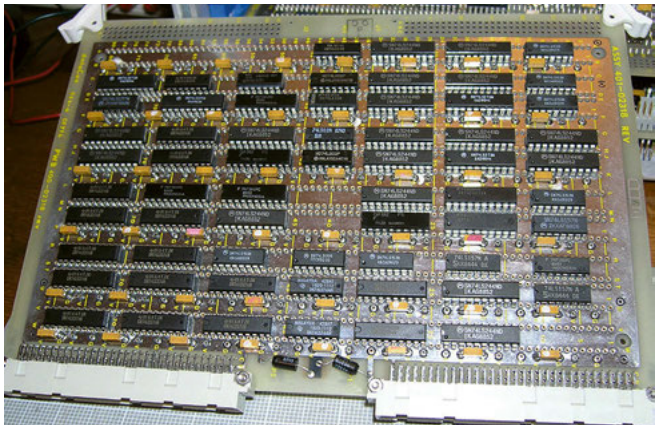


Figure 19-9. *Carte-mère d'un ordinateur réalisée avec des circuits intégrés 74xx. Elle remplit les fonctions centrales d'un serveur web.*

Figure 19-10. *Jeu de simulation de la guerre de Sécession de Jef Palenik. Un autre pupitre de contrôle, destiné au joueur adverse, est situé du côté opposé.*

Si vous êtes suffisamment motivé, vous pourriez également réaliser un jeu à deux joueurs simulant la bataille d'Antietam durant la guerre de Sécession. Jeff Palenik, un de mes lecteurs, l'a fait : il m'a envoyé des photos pour le prouver. Il a utilisé dix-neuf plaques de montages équipées de divers circuits intégrés logiques et temporisateurs, ainsi qu'un grand nombre de fils de liaisons, comme vous pouvez le voir sur les figures 19-10 et 19-11. Je parie que ce circuit nécessite plus qu'une pile de 9 V.

Historique : origines de la logique

Le concept des portes logiques découle des travaux théoriques de George Boole, un mathématicien britannique né en 1815. Il réussit à faire ce qu'aucune personne n'a eu la chance, ou le talent de faire avant : il créa une nouvelle discipline mathématique.

Curieusement, elle n'était pas basée sur des nombres. Boole avait un esprit logique sans limites, il voulait réduire le monde à une série d'états vrais ou faux pouvant se superposer de façons intéressantes.

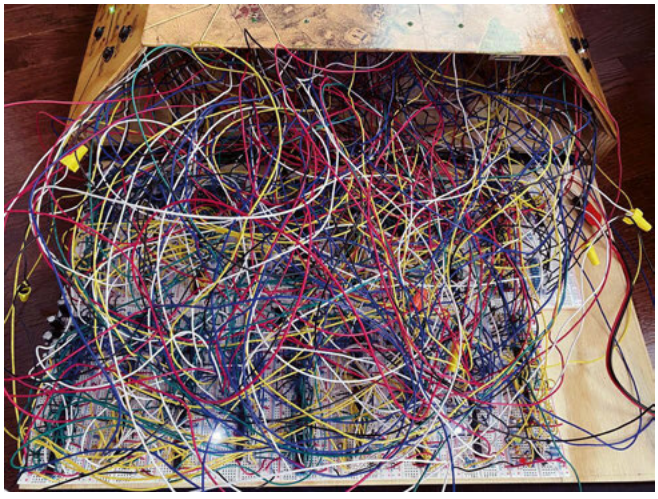


Figure 19-11. *Vue de l'intérieur du jeu de simulation. Quelques plaques de montages sont visibles en bas de l'image.*

Les diagrammes de Venn, ont été conçus aux alentours de 1880 par John Venn. Ils permettaient de représenter les relations logiques que Boole avait décrites. La figure 19-12 montre un diagramme de Venn assez simple, définissant les propriétés des créatures du monde. Sur la figure 19-13, je vous montre ce concept d'une façon différente selon ce que l'on nomme une ***table de vérité***, dans laquelle le rouge signifie VRAI, et le bleu FAUX. Cette table pose deux questions : la créature vit-elle sur terre, et est-ce qu'elle vit dans l'eau ? Si la réponse à ces deux questions est VRAI, il s'agit d'un amphibien (qui recouvre les deux cercles du second diagramme de Venn). Je me référerai à cela par A ET B.

Dans l'expérience que vous venez de faire avec une porte ET, si vous avez nommé les deux interrupteurs A et B, la sortie de cette porte fera exactement ce que dit la table de vérité.

Ces idées simples ont des conséquences infinies, mais je dois d'abord terminer l'histoire de George Boole.

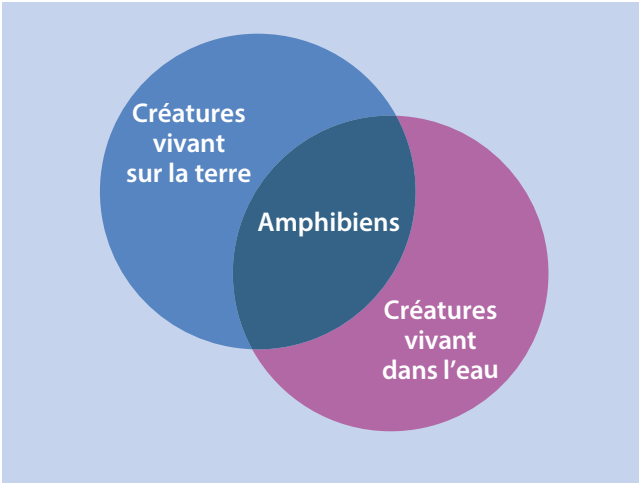


Figure 19-12. *Deux catégories de créatures qui se superposent.*

Son traité sur la logique a été publié en 1854, bien avant que les transistors, ou même les tubes électroniques n'aient été inventés. En fait, durant sa vie, ses travaux semblaient n'avoir aucune application pratique. Mais un homme appelé Claude Shannon découvrit ces travaux durant ses études au MIT, en 1930, et en 1938, il publiait un article décrivant comment une « analyse booléenne » pouvait s'appliquer à un circuit utilisant des relais. Il y eut des applications immédiates dans les réseaux téléphoniques utilisant des relais, et qui croissaient rapidement.

À cette époque, deux usagers vivant dans des habitations rurales distinctes pouvaient se partager une même ligne

téléphonique. Si la personne A voulait utiliser la ligne, ou si la personne B le voulait, ou si aucune ne voulait l'utiliser, tout était parfait. Mais si A ET B voulaient l'utiliser, il y avait un problème. Cette fois encore, vous pouvez voir la même configuration logique, et quand les ingénieurs ont dû concevoir les réseaux qui devaient traiter ces problèmes de connexions par milliers, ces représentations sont devenues importantes.

Cette créature est-elle un amphibien ?		
A. Est-ce qu'elle vit vit sur terre ?	B. Est-ce qu'elle vit dans l'eau ?	A ET B
●	●	●
●	●	●
●	●	●
●	●	●

Figure 19-13. *Table de vérité dérivée de la figure 19-12.*

Le chiffre A vaut-il 1 ?	Le chiffre B vaut-il 1 ?	Est-ce que A + B est supérieur à 1 ?
●	●	●
●	●	●
●	●	●
●	●	●

Figure 19-14. *Table de vérité aidant à réaliser l'addition de deux nombres*

Après l'application de la logique booléenne aux réseaux téléphoniques par Shannon, l'étape suivante était de savoir, en représentant une condition « VRAI » par le chiffre 1, et une condition « FAUX » par le chiffre 0, si l'on pouvait imaginer un système pouvant compter. Et s'il le pouvait, il pourrait réaliser des opérations. La table de vérité de la figure 19-14 montre comment l'opération ET (AND) peut être utilisée pour faire une addition simple.

Quand les tubes électroniques ont remplacé les relais, les premiers calculateurs numériques ont été conçus.

Les transistors ont ensuite pris la place des tubes, puis les circuits intégrés, aboutissant aux ordinateurs portables dont nous profitons maintenant. Mais au plus profond des niveaux de base de ces appareils incroyablement complexes, la logique booléenne est toujours utilisée.

Fondamentaux : les portes logiques de base

Les termes ET et OU que vous venez de rencontrer sont des *opérateurs booléens*, mais comme je l'ai dit précédemment, sept sont importants pour nous. Il s'agit des ET, OU, NON-ET, NON-OU, OU, NO-OU EXCLUSIF et NON (respectivement AND, OR, NAND, NOR, XOR, NXOR et NOT en anglais). Les symboles logiques qui les représentent sont sur la figure 19-15. Leurs noms sont généralement écrits en lettres majuscules. De nombreux diagrammes logiques utilisent les dénominations anglo-saxonnes qu'il est utile de connaître.

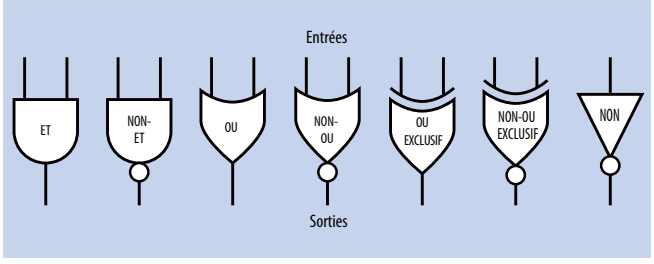


Figure 19-15. *Symboles des sept opérateurs logiques utilisés dans les ordinateurs.*

Les portes de base possèdent deux entrées et une sortie, à l'exception de la porte NON (NOT) qui ne comporte qu'une entrée et une sortie, et que l'on appelle en général un *inverseur*. Si son entrée est haute, il génère une sortie basse,

et si son entrée est basse, il délivre une sortie haute. Je ne l'utiliserai pas ici.

Remarquez les petits cercles placés au niveau des sorties. Ils servent à indiquer une inversion de la sortie. (Ces cercles sont appelés des *bulles*.) Par exemple, la sortie d'une porte NON-ET est l'inverse de la sortie d'une porte ET.

Qu'est-ce que signifie « inversée » ? Cela sera plus clair si vous observez les tables de vérité des portes logiques qui sont dessinées sur les figures 19-16, 19-17 et 19-18. Sur chaque ligne de chaque table, les deux entrées sont représentées à gauche, suivies par la sortie sur la droite. Le rouge représente un niveau logique haut, tandis que le bleu représente un niveau logique bas. Comparez les sorties de chaque paire de portes pour voir comment les sorties sont inversées.

Technique : TTL et CMOS

Dans les années 1960, les premières portes logiques étaient fabriquées en technologie TTL (TRANSISTOR-TRANSISTOR-LOGIC). Elles étaient constituées de minuscules transistors bipolaires. Rappelez-vous que le temporisateur 555 est un composant TTL.

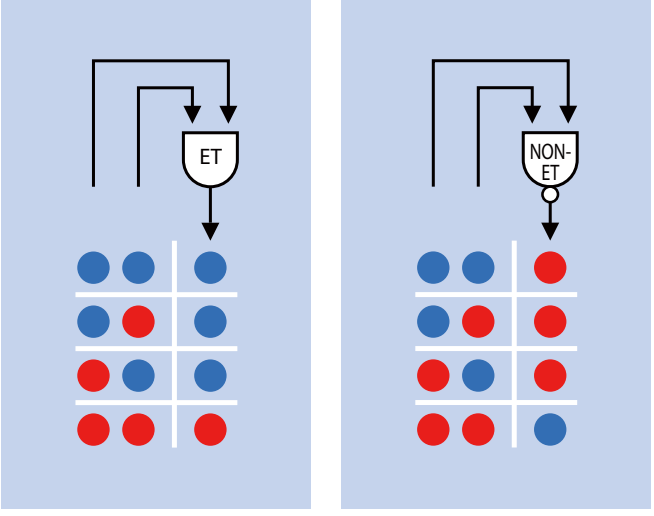


Figure 19-16. *Tables de vérité des portes logiques ET et NON-ET.*

Du fait de la consommation importante des circuits intégrés TTL, il y avait une forte incitation à l'utilisation de transistors *CMOS* (Complementary Metal Oxyde Semiconductors). Ces composants utilisaient moins d'énergie, mais ils étaient nettement plus lents.

Pendant longtemps, chacun devait choisir entre hautes performances et consommation énergétique élevée des circuits TTL, ou les performances moindres de la technologie CMOS, moins énergivore. Les deux familles de puces étaient en compétition selon ces paramètres, elles étaient identifiées par des références commençant par 74xx pour les circuits TTL, et 4xxx pour les circuits CMOS.

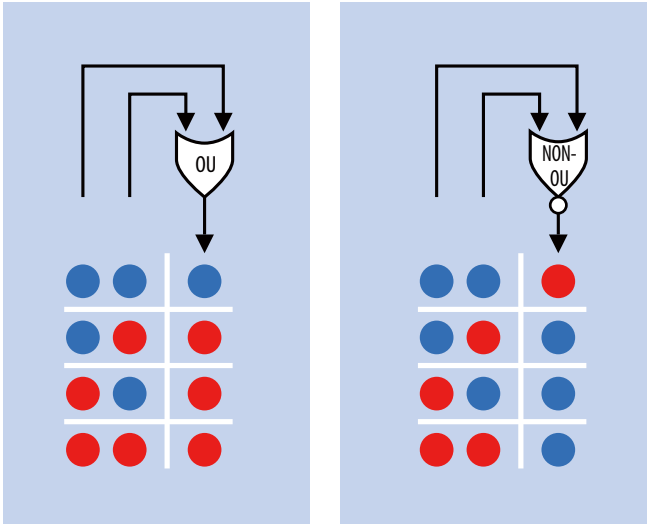


Figure 19-17. *Tables de vérité des portes logiques OU et NON-OU.*

Il s'avère que la technologie CMOS a gagné la partie. Au fur et à mesure que les avancées technologiques amélioraient leurs performances, les fabricants ont produit des circuits intégrés qui émulaient les fonctions des puces 74xx, et copiaient leurs références. Aujourd'hui, chaque puce de la famille 74xx possède un équivalent CMOS.

Les versions TTL d'origine sont maintenant obsolètes, il est cependant possible de se procurer des puces de la série 74LSxx en pièces de remplacement.

Les anciennes puces 4xxx existent toujours, comme par exemple la puce 4026B que vous avez utilisée dans l'expérience 19. Dans certaines applications, leur vitesse relativement faible importe peu, et ils ont l'avantage unique de permettre l'utilisation d'une plage de tension d'alimentation

plus importante que la série des puces 74xx. Dans ce livre, j'ai utilisé un circuit intégré 4xxx parce qu'il pouvait partager une alimentation de 9 V CC avec le temporisateur 555.

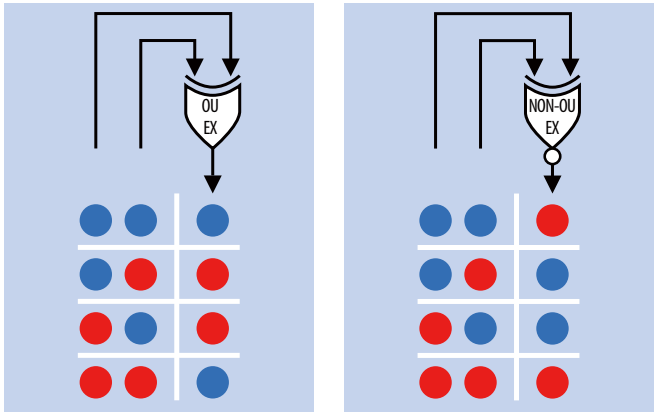


Figure 19-18. *Tables de vérité des portes logiques OU EXCLUSIF et NON-OU EXCLUSIF.*

Voici quelques informations à retenir :

- La famille 74xx a évolué au cours de nombreuses générations, mais les versions HC sont celles que j'ai retenues ici (comme le 74 HC08 contenant des portes ET), car elles sont très courantes.
- Vous trouverez toujours des schémas qui utilisent des anciens circuits 74LSxx. Vous pouvez les remplacer par des circuits intégrés 74 HCTxx car ils ont des spécifications identiques.
- Les puces 4xxx sont toujours présentes, mais actuellement, elles possèdent des références se terminant par la lettre B. Les autres composants 4xxx sont maintenant obsolètes et ne doivent plus être utilisés.
- La signification des niveaux logiques HAUT et BAS des puces 4xxx est différente de celle des circuit intégrés 74xx, bien qu'ils soient tous alimentés par une tension de 5 V. Ce n'est en général pas important.

Si vous achetez des puces 74xx de la génération HC, incluez les lettres HC dans la recherche d'une référence. Par exemple, recherchez 74 HC08, et non 7408.

Vous verrez cependant que dans mes listes de matériels de référence (comme sur la figure 19-8), j'ai listé des références 74xx sans lettres, car toutes les générations ont un brochage identique.

Pour trouver des informations complémentaires vous permettant de comprendre et interpréter les références 74xx, reportez-vous à la figure 15-3.

Les portes cachées

Pour référence future, j'ai préparé 14 diagrammes montrant les portes logiques présentes dans les puces à trous traversants généralement disponibles. Ils sont sur les figures 19-19 à 19-25 dans les pages suivantes. Vous ne connaissez pas encore le comportement de ces portes, mais j'ai pensé préférable de regrouper toutes les informations en un seul endroit.

Vous remarquerez que plusieurs portes logiques ont plus de deux entrées, même quand les tables de vérité que je vous ai montrées précédemment n'en comportaient que deux. Si vous revenez aux figures 19-16 à 19-18, vous pouvez les considérer de la façon suivante :

Porte ET : La sortie est normalement basse. Elle devient haute si ***toutes*** les entrées sont au niveau haut.

Porte NON-ET : La sortie est normalement haute. Elle devient basse si ***toutes*** les entrées sont au niveau haut.

Porte OU : La sortie est normalement haute. Elle devient basse si ***toutes*** les entrées sont au niveau bas.

Porte NON-OU : La sortie est normalement basse. Elle devient basse si ***toutes*** les entrées sont au niveau bas.

Dans cette énumération, «toutes» signifie toutes les entrées du type de porte considéré. Le nombre maximum est de huit. Les portes OU EXCLUSIF et NON-OU EXCLUSIF ne sont en général pas disponibles avec plus de deux entrées, sauf si elles sont conçues pour une application spécifique.

Fondamentaux : règles d'interconnexion des portes logiques

Les circuits intégrés 74xx sont très simples à mettre en œuvre, vous pouvez les chaîner sans utiliser de composants additionnels La sortie d'une porte ET peut être reliée directement à l'entrée d'une autre porte d'une autre puce 74xx, tout fonctionnera parfaitement !

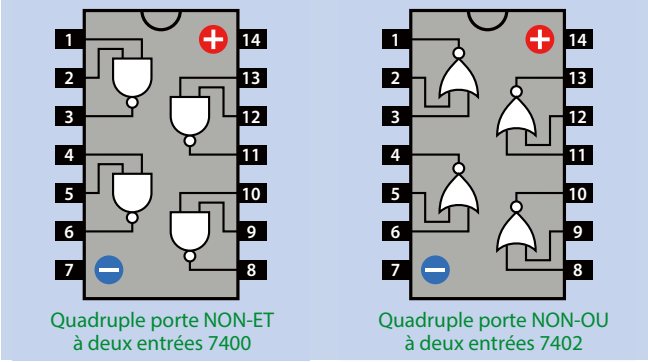


Figure 19-19. *Configuration standard des circuits intégrés quadruple porte NON-ET et NON-OU à deux entrées, de la famille 74xx.*

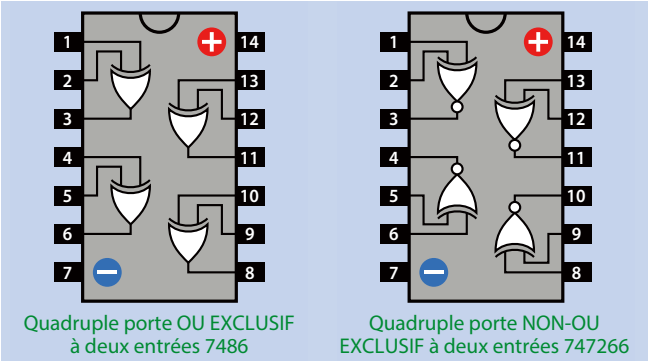


Figure 19-20. *Configuration standard des circuits intégrés quadruple porte OU EXCLUSIF et NON-OU EXCLUSIF à deux entrées, de la famille 74xx.*

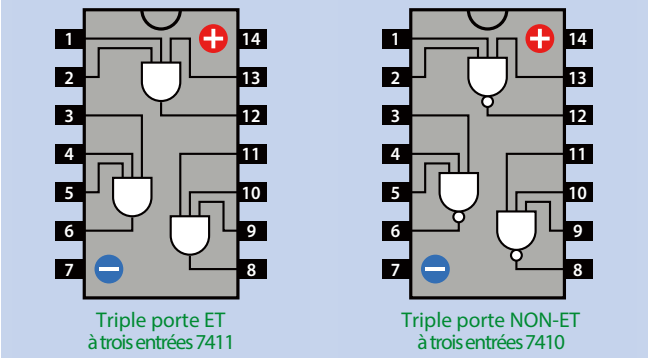


Figure 19-21. *Configuration standard des circuits intégrés triple porte ET et NON-ET à trois entrées, de la famille 74xx.*

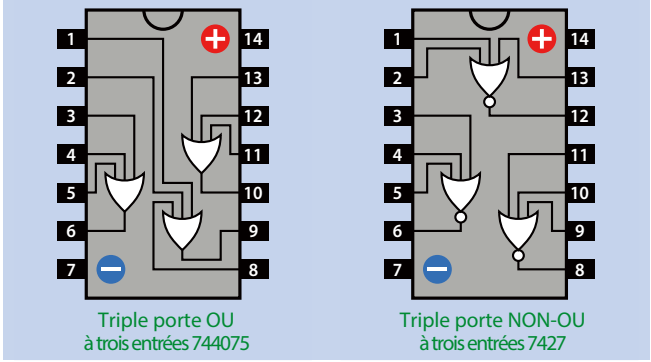


Figure 19-22. *Configuration standard des circuits intégrés triple porte OU et NON-OU à trois entrées, de la famille 74xx.*

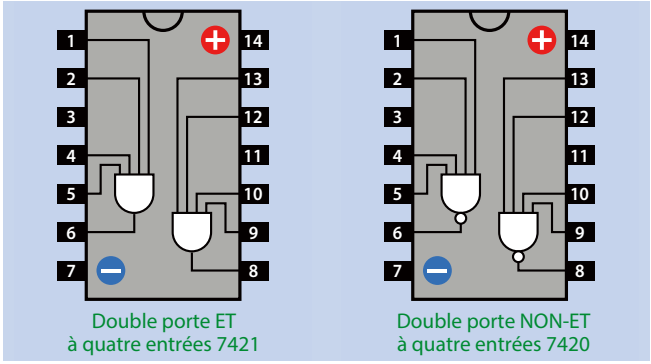


Figure 19-23. *Configuration standard des circuits intégrés double porte ET et NON-ET à quatre entrées, de la famille 74xx.*

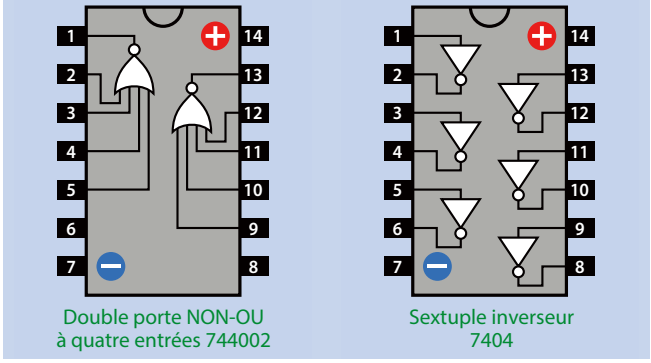


Figure 19-24. *Configuration standard des circuits intégrés double porte NON-OU à quatre entrées, et sextuple porte NON (inverseur), de la famille 74xx.*

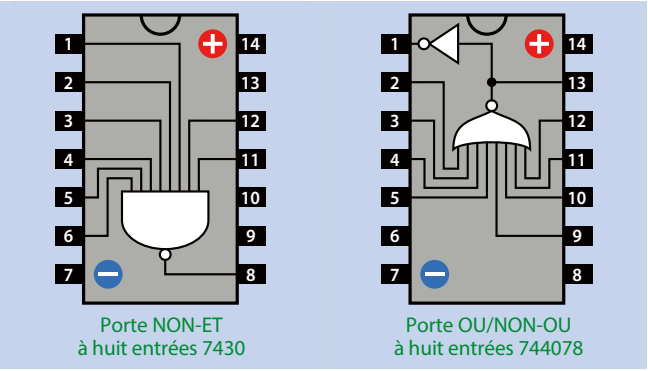


Figure 19-25. *Configuration standard des circuits intégrés porte NON-ET à huit entrées, et porte OU/NON-OU à huit entrées, de la famille 74xx.*

Il y a cependant des règles dont il faut se souvenir :

Autorisé :

- Vous pouvez relier directement n'importe quelle entrée d'une porte logique à votre source d'alimentation, soit côté positif, soit côté négatif.
- La sortie d'une porte peut être partagée par les entrées de plusieurs autres portes (c'est ce que l'on appelle la *sortance*, ou le *facteur de charge* en français, *fanout* en anglais). Le nombre exact dépend de la puce, pour la série 74 HCxx, vous pouvez relier au moins dix entrées à une seule sortie logique.
- La sortie d'une puce logique peut piloter la gâchette (broche 2) d'un temporisateur 555, à condition que sa tension d'alimentation soit 5 V CC et qu'il partage la même masse que la puce logique.
- La plage de tensions acceptables des entrées et la valeur minimale de la tension de sortie sont indiquées sur la figure 19-26.

Non autorisé :

- Aucune entrée ne doit être flottante ! Sur les puces CMOS, vous devez relier toutes les broches d'entrée à une tension connue. Les entrées des portes inutilisées d'une puce doivent être reliées à la masse.
- Tout interrupteur à simple contact ou bouton-poussoir doit être utilisé conjointement avec une résistance de tirage, ou une résistance de rappel, afin que l'entrée de la puce ne soit pas flottante quand les contacts sont ouverts.
- Ne jamais utiliser une source d'alimentation non régulée ou supérieure à 5 V CC pour alimenter des circuits intégrés 74xx.

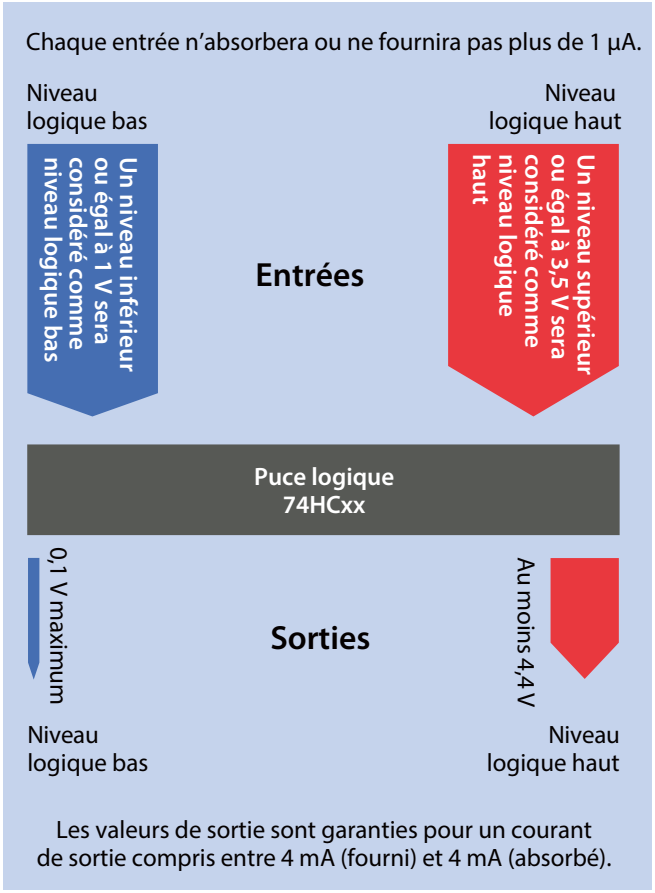


Figure 19-26. *Afin d'éviter les erreurs, respectez les limites des niveaux d'entrées recommandées pour les circuits intégrés logiques.*

- Soyez prudent quand vous utilisez la sortie d'une puce 74xx pour piloter une LED. Si vous absorbez un courant supérieur à 4 mA, vous risquez d'écrouler la tension de sa sortie. En conséquence, si vous reliez cette sortie à l'entrée d'une autre puce, la tension pourrait chuter sous le minimum requis par la seconde puce pour qu'elle considère son entrée au niveau logique haut.

De façon générale, *n'utilisez pas une sortie logique* pour piloter une LED *si vous l'utilisez simultanément* comme entrée d'un autre circuit logique. (J'ai violé cette règle dans un des circuits de ce livre, essayez de le trouver.)

- La sortie d'une porte logique peut fournir du courant quand son niveau logique est haut, ou en absorber si son niveau logique est bas, mais uniquement si vous en contrôlez l'intensité. Ne reliez jamais la sortie d'une porte logique directement au pôle positif de l'alimentation ou à la masse.
- Évitez de relier ensemble les sorties de deux (ou plus) portes logiques.

J'en ai terminé avec les recommandations à faire ou ne pas faire. Il est maintenant temps de passer à votre premier projet important utilisant des circuits intégrés logiques.

Expérience 20
Un verrou électronique

Imaginons que vous souhaitiez éviter que d'autres personnes puissent utiliser votre ordinateur. Je connais deux façons d'y parvenir : soit en utilisant un logiciel, soit en mettant en œuvre une solution matérielle.

Le logiciel serait par exemple un programme de démarrage qui intercepterait la séquence normale d'initialisation de l'ordinateur, afin de demander l'entrée d'un mot de passe de façon plus sécurisée que par la protection standard de Windows ou du système d'exploitation d'un Mac.

Personnellement, je pense qu'il est plus intéressant (et que cela correspond mieux à ce livre) de le faire par une solution matérielle. J'imagine par exemple l'utilisation d'un clavier numérique permettant à l'utilisateur d'entrer un code secret avant de pouvoir mettre l'ordinateur sous-tension. Je l'appelle « verrou électronique », bien qu'il ne contienne aucun verrou. Le principe consiste à contourner l'usage du bouton normalement utilisé pour la mise en marche de votre ordinateur.

Attention : réfléchissez bien à ce sujet !

Ce projet est-il une bonne idée ? Telle est la question !

Pour installer le verrou électronique dans votre ordinateur, vous devrez l'ouvrir, couper un fil, et y relier votre circuit.

Vous n'aurez certes pas à intervenir près des cartes de circuits imprimés, et devrez faire la modification près du « bouton de démarrage » qui utilise une tension faible, mais la phrase « annule votre garantie » me vient à l'esprit.

Vous devriez peut-être vous contenter de réaliser ce circuit sur une plaque de montage pour simuler le déverrouillage d'un ordinateur. Vous déciderez ensuite de continuer ou non.

Vous pourrez toujours vous en servir avec un autre appareil, comme par exemple le système d'alarme anti-intrusion de l'expérience 17. Ce serait probablement une meilleure idée.

Vous aurez besoin de :

- 1 plaque d'essais, des fils de liaison, une pince coupante, une pince à dénuder, un multimètre
- 1 source d'alimentation de 9 V CC, probablement une pile dans ce projet
- 1 LED générique
- 1 régulateur de tension LM7805
- 2 puces quadruples ET à deux entrées 74 HC08
- 1 temporisateur 555
- 1 relais 9 V bipolaire inverseur DPDT
- résistances : 470 ohms (1), 10K (9), 100K (1)
- condensateurs : 0,01 µF (1), 0,1 µF (1), 0,47 µF (2), 10 µF (1)
- 9 interrupteurs tactiles
- 1 transistor 2N3904

Technique : les systèmes à code

Je souhaite commencer par vous expliquer le fonctionnement habituel d'un système à code secret. Supposez que vous rendiez visite à un ami qui habite dans une résidence fermée, ou que vous deviez déposer des affaires dans un local de stockage. Vous vous retrouverez devant un clavier comportant 10 ou 12 boutons, et vous devrez entrer un nombre de trois ou quatre chiffres. Si vous l'avez correctement saisi, la porte s'ouvrira.

Cela paraît simple, mais en réalité, ce n'est pas le cas. La première fonction nécessaire est de pouvoir mémoriser les chiffres entrés jusqu'à ce que la séquence soit terminée. Il faut donc une mémoire. Par chance, les mémoires à circuits intégrés se trouvent facilement, mais elles ont besoin d'autres composants pour fonctionner. Vous devrez également convertir chaque touche appuyée en un code adapté à son stockage en mémoire.

Puis un processus de vérification devra comparer le code entré avec le code de déverrouillage, qui devra également être mémorisé. Même à ce point, tout n'est pas dit, car le système doit également pouvoir prendre en compte les erreurs d'utilisation. Comment agir, si l'utilisateur entre un code à cinq chiffres au lieu de quatre ? Doit-il ignorer le premier ou le dernier chiffre ? Doit-il rejeter le code dans sa totalité et demander à la personne de recommencer ? En ce cas, combien d'essais seront possibles ? Doit-on prévoir un écran LCD pour afficher un message d'erreur ?

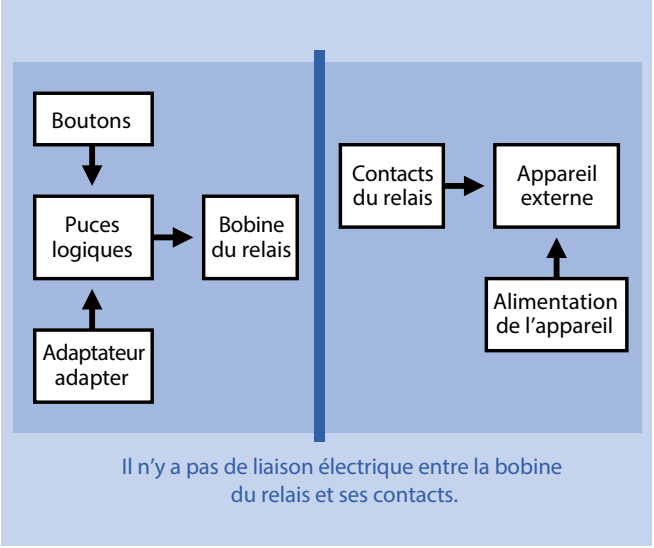


Figure 20-1. *Un relais réalise un lien mécanique entre sa bobine et ses contacts, mais sans connexion électrique.*

Peut-être pouvez-vous comprendre comment un tel projet peut devenir complexe. Pour ce livre, j'ai besoin de quelque chose de plus simple : un circuit qui sera facile à réaliser en une heure environ, utilisant des portes logiques, et pouvant tenir sur une plaque de montage. Telle est la mission.

En ayant cela à l'esprit, j'ai légèrement diminué les objectifs. Au lieu que la personne entre une série de chiffres, elle devra appuyer simultanément sur une sélection de boutons. Une puce logique peut le faire, en analysant la configuration activée, et si elle est correcte un temporisateur 555 (je pense que vous l'aviez deviné) activerait un relais.

Un relais est nécessaire car je ne veux pas que l'alimentation de mon circuit soit reliée à un autre dispositif externe qui sera activé, et désactivé. Les relais sont lents et rustiques, mais ils sont conçus pour que la bobine ait une liaison mécanique avec les contacts, sans connexion électrique. La figure 20-1 montre ce concept.

Combien de boutons ?

Appuyer simultanément sur plusieurs boutons est une approche inhabituelle, mais je pense qu'elle peut offrir une sécurité adéquate si le nombre de boutons est suffisant. Ce sera sécurisé également parce que les gens ne sauront pas comment l'utiliser.

Choix d'une sélection dans un ensemble de 8 boutons	
Taille de la sélection	**Nombre de combinaisons**
1	8
2	28
3	56
4	70
5	56
6	28
7	8

Figure 20-2. *Nombre de possibilités pour appuyer simultanément sur une sélection parmi huit boutons, selon la formule « k parmi n ».*

J'imagine le scénario suivant.

Un casseur de code invétéré est si pressé de pouvoir examiner les fichiers présents dans votre disque dur qu'il s'est imaginé pouvoir contourner la protection par mot de passe de votre ordinateur en démarrant un système Unix avec une clé USB qu'il emporte toujours avec lui. Mais voyons, qu'est-ce que c'est ? Un clavier numérique !

Il imagine alors qu'il s'agit d'un dispositif dans lequel il doit entrer une série de chiffres, comme avec tous les claviers. Parfait, il s'y applique. Il essaie tous les nombres qui ont un sens pour vous. Il entre votre année de naissance, la date à laquelle vous avez obtenu votre baccalauréat, votre numéro de téléphone, les trois chiffres de votre plaque d'immatriculation. Rien ne fonctionne !

Même s'il devine que plusieurs boutons doivent être pressés simultanément, il ne peut pas savoir combien. Ce serait sûrement deux ou trois, mais imaginons qu'il y ait huit boutons parmi lesquels choisir. Combien y a-t-il de façons d'appuyer simultanément sur une sélection de boutons.

C'est une question intéressante. En mathématiques combinatoires, ce type de problème s'appelle « k parmi n », où n est le nombre d'objets dans un ensemble, et k est le nombre d'objets que vous devez choisir parmi eux.

Vous pouvez rechercher en ligne la formule pour faire ce calcul, il y a même des sites qui font le calcul à votre place. Si par exemple j'utilise huit boutons dans cette expérience, la figure 20-2 indique le nombre de possibilités d'appuyer simultanément sur une quantité donnée de boutons. Si vous devez appuyer uniquement sur deux boutons, vous pouvez choisir les combinaisons 1 et 2, ou 1 et 3, ou 2 et 3, ou 2 et 4… et ainsi de suite, vous aurez 28 choix possibles.

Vous remarquerez que le nombre de combinaisons croît, ou décroît en fonction de la taille de la sélection choisie. Voyez-vous pourquoi ? C'est parce que cela revient au même que de ne pas choisir les boutons restants. Mais vous ne lisez pas ce livre pour que je vous parle de mathématiques.

Revenons à notre sujet.

Si vous augmentez la valeur de n (le nombre de boutons) au-delà de huit, le nombre de combinaisons augment très rapidement. Ainsi, il y a 252 façons de choisir cinq boutons parmi dix, et 924 de choisir six boutons parmi douze… Je suppose que vous ne souhaitez pas acheter et câbler plus de huit boutons, je vais donc prévoir que l'utilisateur ait à appuyer sur quatre boutons parmi huit. Cela représente 70 possibilités, ce n'est pas très important, mais je pense que cela procure un niveau de sécurité raisonnable, surtout dans le cadre du scénario que j'ai décrit précédemment. J'ai quelques idées pour accroître la sécurité du verrou électronique, j'y reviendrai par la suite.

Technique : le diagramme logique

Quoi qu'il en soit, j'ai besoin de portes logiques pour vérifier que la combinaison de quatre boutons pressés parmi les huit est correcte. Il y a cependant un besoin complémentaire : *aucun* autre bouton ne doit être enfoncé. Sinon, il suffirait à quelqu'un d'appuyer simultanément sur les huit boutons pour déverrouiller le système.

Numérotons les boutons de 1 à 8, et supposons que la combinaison secrète correspond à l'appui des boutons 1,

2, 3 et 4. Il est évident que dans sa version définitive, je ne regrouperai pas les quatre boutons, je les répartirai selon une disposition non intuitive. Toutefois, pour la démonstration et les tests, je vais regrouper les boutons 1 à 4 en haut de la plaque de montage, et les boutons 5 à 8 en seront éloignés.

Laissez-moi résumer ce qui doit se passer pour déverrouiller le système :

Tous les boutons 1, 2, 3 et 4 doivent être simultanément pressés.

Aucun des boutons 5, 6, 7 ou 8 ne doit être enfoncé.

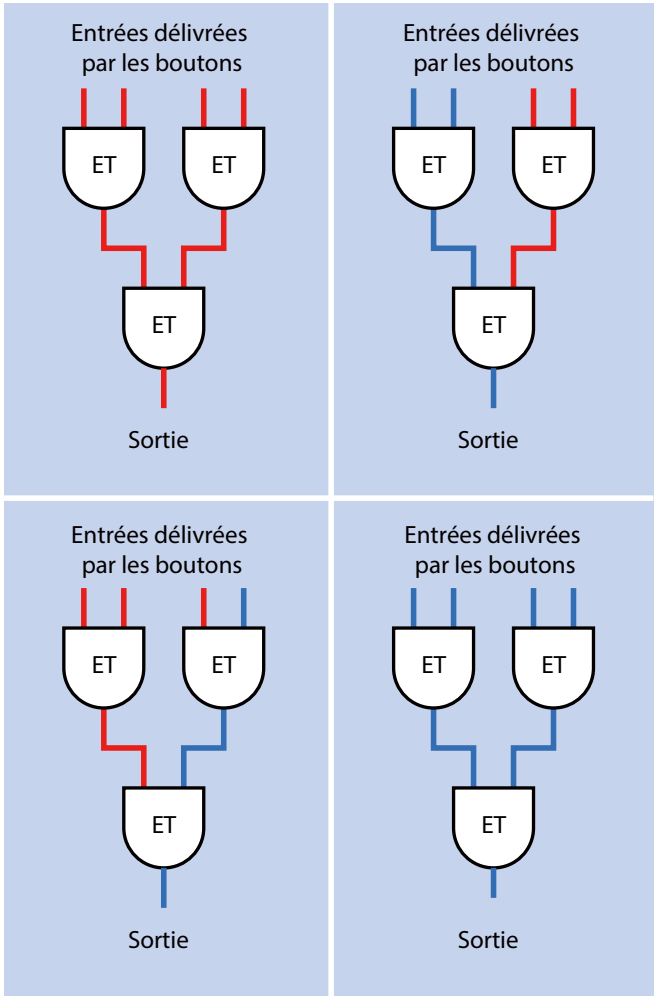


Figure 20-3. *Diagramme logique de trois portes ET superposées.*

Quels composants devrais-je utiliser pour faire cela ? Quand j'ai écrit « 1, 2, 3 et 4 », avez-vous remarqué le mot « et » présent dans la phrase ? Oui, je dois utiliser des portes ET. Si vous revenez à la figure 19-23, vous verrez que la puce 7421 contient une porte ET à quatre entrées (en réalité, il en contient deux). Une de ces portes serait idéale pour mon objectif, mais je ne souhaite pas que mes lecteurs achètent plus de composants que nécessaire. J'ai déjà utilisé des portes ET à deux entrées dans l'expérience précédente, je peux peut-être les réutiliser, d'une façon ou d'une autre. La puce contient en réalité quatre de ces portes, il y a probablement une façon de les combiner entre-elles pour pouvoir traiter quatre entrées. Oui, en effet, une telle possibilité existe, la figure 20-3 montre comment y parvenir. Elle montre quelques combinaisons des boutons d'entrée, je vous laisse le soin, si vous le souhaitez, de considérer les autres combinaisons.

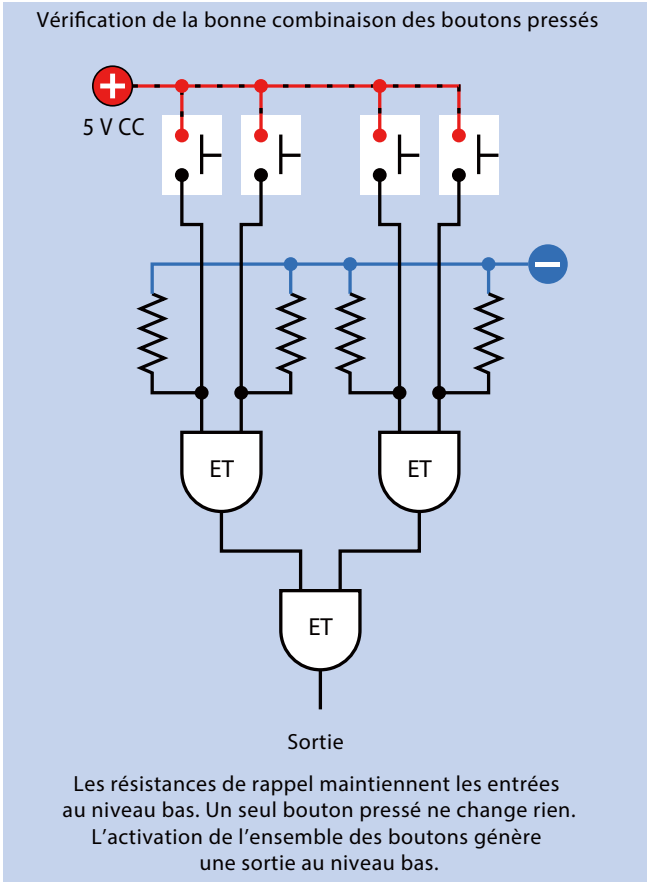


Figure 20-4. *Diagramme logique des trois portes ET empilées.*

Rappelez-vous, selon la figure 19-16, chaque porte ET possède une sortie logique normalement au niveau bas. Pour la mettre au niveau haut, il faut que ses deux entrées soient au niveau HAUT. Après avoir observé la figure 20-3, je pense que vous comprendrez que pour que la sortie soit au niveau haut, ***toutes*** les entrées au-dessus doivent être au niveau haut. Donc, si les boutons 1, 2, 3 et 4 délivrent une tension positive aux entrées des portes, la sortie située en bas, sera positive si tous les boutons sont enfoncés. La figure 20-4 montre comment les boutons et les résistances de rappel peuvent être ajoutés, un résumé des opérations se situe en bas de la figure. Les entrées de la troisième porte ET n'ont pas besoin de résistance de rappel, car les sorties des autres portes sont toujours au niveau logique haut ou bas, elles ne sont jamais flottantes.

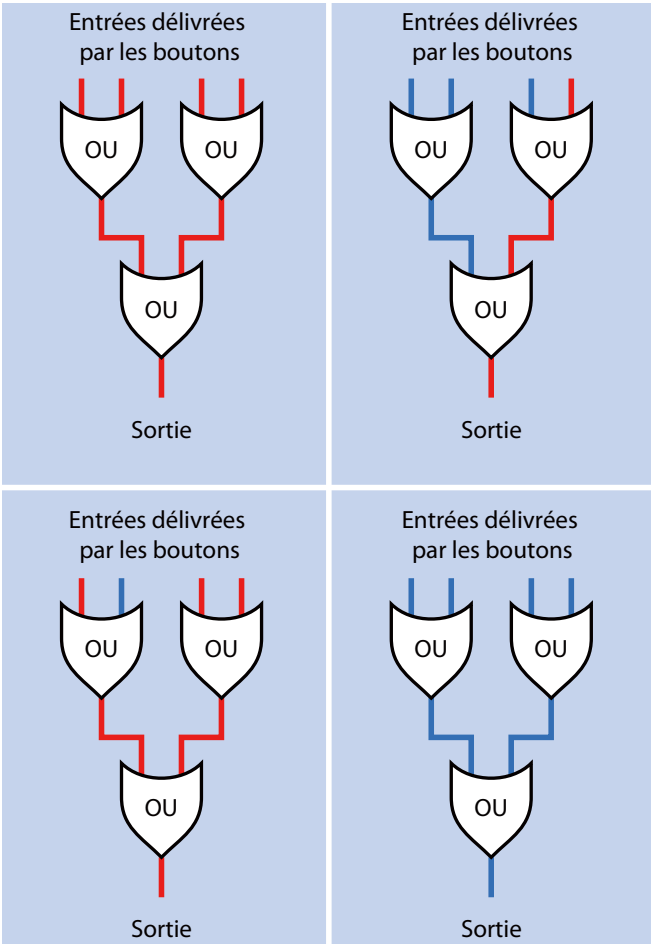


Figure 20-5. *Diagramme logique de trois portes OU superposées.*

Il est toujours possible d'ajouter des portes en chaîne, sans utiliser de résistances de rappel ou de tirage.

Maintenant, qu'en est-il des boutons qui ***ne doivent pas*** être appuyés ? Il me semble que je vais avoir besoin de portes complémentaires aux portes ET. Serait-ce des portes OU ? Ou bien des portes NON-ET ? Ou bien quoi d'autre ?

En fait, on pourrait utiliser un empilage de portes OU, comme sur la figure 20-5. La sortie de chaque porte OU est au niveau bas si ses deux entrées sont au niveau bas. Si l'une de ses entrées devient haute (ou les deux), la sortie de la porte OU passe au niveau haut. Si je relie les boutons-poussoirs au pôle positif de l'alimentation, l'appui de l'un d'entre eux rendra la sortie de la porte positive, ce qui indiquerait que quelqu'un essaie de déverrouiller le système, en appuyant sur un mauvais bouton.

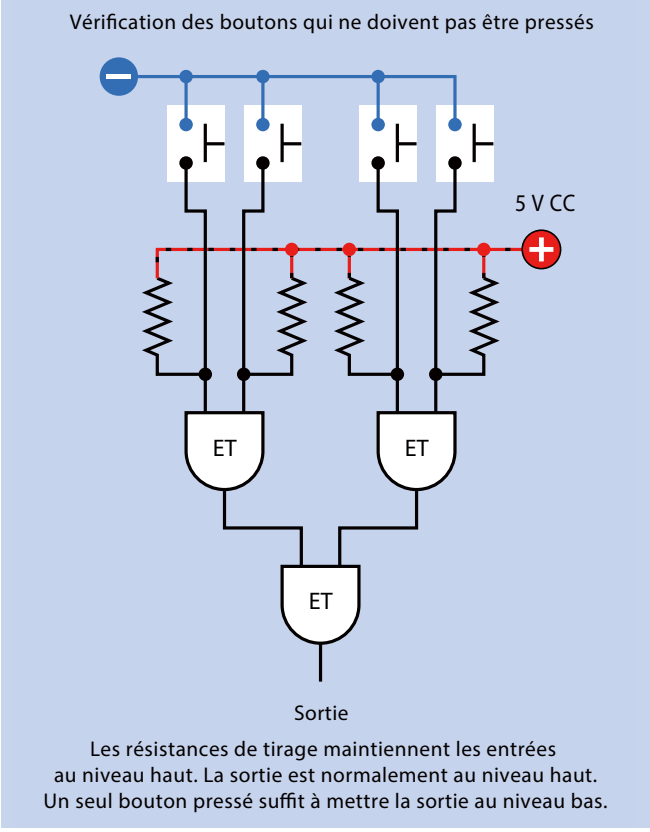


Figure 20-6. *Détection, par des portes ET, des boutons qui ne doivent pas être activés.*

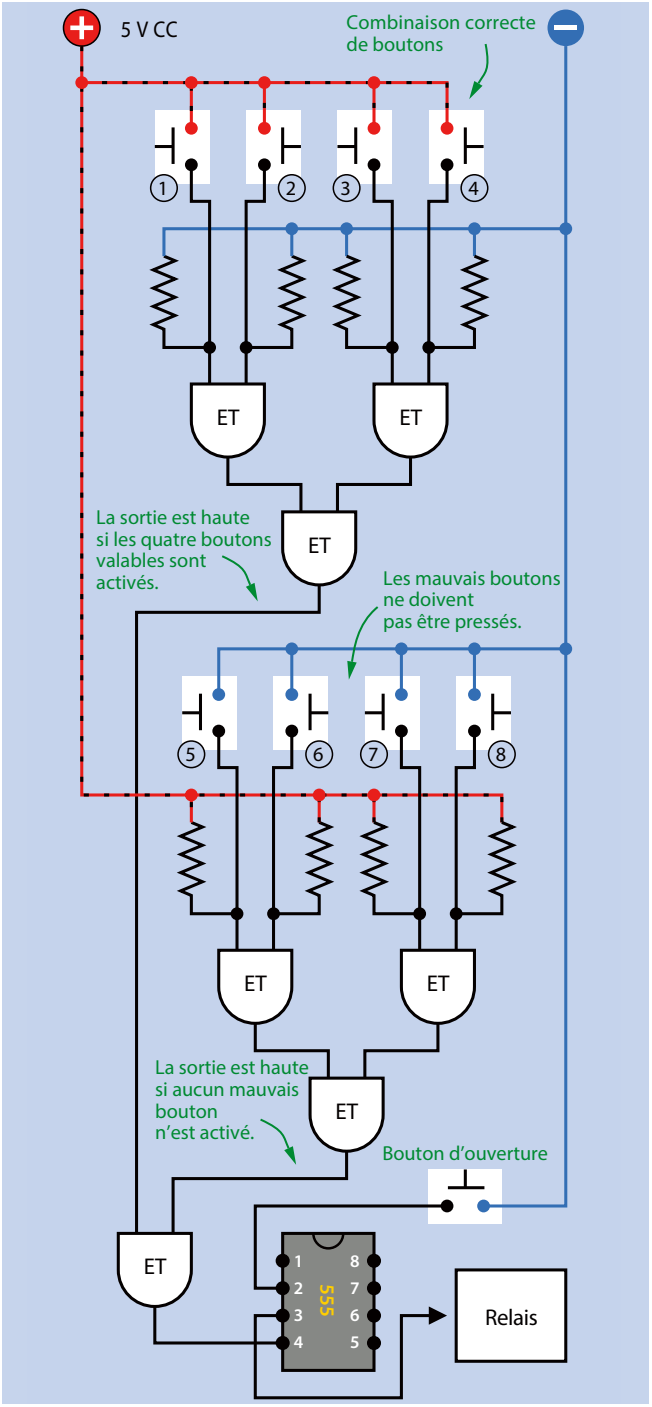


Figure 20-7. *Traitement, par des portes ET, de tous les boutons qui ne doivent pas être activés.*

Quand j'ai conçu le verrou électronique, mon intuition me disait d'utiliser des portes OU, car comme je l'ai dit précédemment, « a*ucun* des boutons 5, 6, 7 ou 8 ne doit être enfoncé », il y a le mot « ou » dans la phrase.

Pas de doute, l'utilisation de portes OU conviendrait. Toutefois, comment utiliser la sortie ?

Mon empilage de portes ET délivrerait une sortie *haute* si les boutons *corrects* étaient enfoncés. Un empilage de portes OU produirait une sortie de niveau *haut*, si un ou plusieurs *mauvais* bouton était activé. Comment concilier tout cela ? J'aurai besoin d'un circuit se comportant ainsi : « si les portes ET délivrent une sortie haute, continuer et déverrouiller le système, sauf si les portes OU délivrent un signal haut, auquel cas il ne faut pas déverrouiller ».

Parfait, mais je ne voyais pas comment le faire facilement. Puis j'ai eu une idée : inversons les niveaux ! La fonction « ne pas appuyer » pourrait être traitée par un autre empilage de portes ET, si les niveaux étaient inversés.

Observez la figure 20-6. Les résistances de tirage maintiennent toutes les entrées de portes ET au niveau haut, forçant la sortie inférieure au niveau haut, sauf si un bouton non valide est pressé.

Cela forcerait la sortie au niveau bas. Vérifiez à l'aide de la figure 20-3, si vous avez besoin d'une clarification.

Voyez-vous pourquoi mon nouveau schéma apporte une amélioration ? J'ai maintenant deux empilages de portes, l'une avec une sortie *haute* quand les boutons *corrects* sont activés, et l'autre dont la sortie est *haute* tant qu'aucun bouton *non valide* n'est pressé. Quand la sortie du premier empilage est au niveau haut, et celle du second empilage est également au niveau haut, le système doit être déverrouillé.

Avez-vous remarqué, à nouveau, le mot « et » dans cette dernière phrase ? Je pourrai donc utiliser une porte ET supplémentaire pour relier les sorties des deux groupes de portes ET, sa sortie au niveau haut permettra le déverrouillage. La figure 20-7 montre ce que je viens de dire. Une porte ET supplémentaire est reliée à la broche de réinitialisation d'un temporisateur 555, et je suis sûr que vous vous en souvenez, quand l'entrée de réinitialisation devient haute, le temporisateur est activé.

Maintenant, la personne qui veut utiliser le verrou électronique doit appuyer sur le bouton « ouverture » qui va

générer une impulsion permettant d'activer le relais. C'est évidemment un schéma simplifié ; je n'ai pas représenté la résistance et le condensateur qui déterminent la largeur de l'impulsion du temporisateur.

J'ai été surpris en réalisant que ce circuit pouvait être construit avec seulement sept portes ET, sans aucune autre puce logique. Un projet est parfois plus simple que l'on ne pense.

Le verrou électronique sur une plaque de montage

Il ne me reste plus qu'à placer tous les composants sur une plaque de montage. C'est toujours difficile quand on utilise beaucoup de boutons-poussoirs, car ils ont tendance à prendre trop de place, et vous devez faire attention à ce que toutes leurs broches soient bien insérées dans des rangées de trous séparées. J'ai fait au mieux, pour simplifier le plan d'implantation de la figure 20-8.

Le plan ne comportant que les composants est représenté sur la figure 20-9, et le schéma sur la figure 20-10.

Notez que j'ai ajouté un transistor pour piloter le relais, afin de vous éviter l'achat d'un nouveau relais de tension 5 V CC, uniquement pour ce circuit, alors qu'il vous restait le relais 9 V CC de l'expérience 7. Le transistor permet d'utiliser la tension de 5 V issue du temporisateur 555, pour activer le relais de 9 V CC. Si par contre, vous disposez d'un relais 5 V, vous pouvez ne pas utiliser le transistor et câbler la bobine du relais entre la sortie du 555 et la masse.

Pour tester le circuit, vous pouvez ajouter une LED avec une résistance en série, entre la sortie du temporisateur et la masse, au lieu d'un appareil externe.

Appuyez maintenant sur les boutons 1 à 4 et aucun des boutons 5 à 8. Cela doit envoyer un signal à la broche de réinitialisation du temporisateur, ainsi, si vous appuyez sur le bouton « ouverture », le temporisateur va réagir. Si vous n'appuyez sur aucun des quatre boutons, ou si vous appuyez sur l'un des boutons invalides, le signal de « déverrouillage » ne sera pas généré.

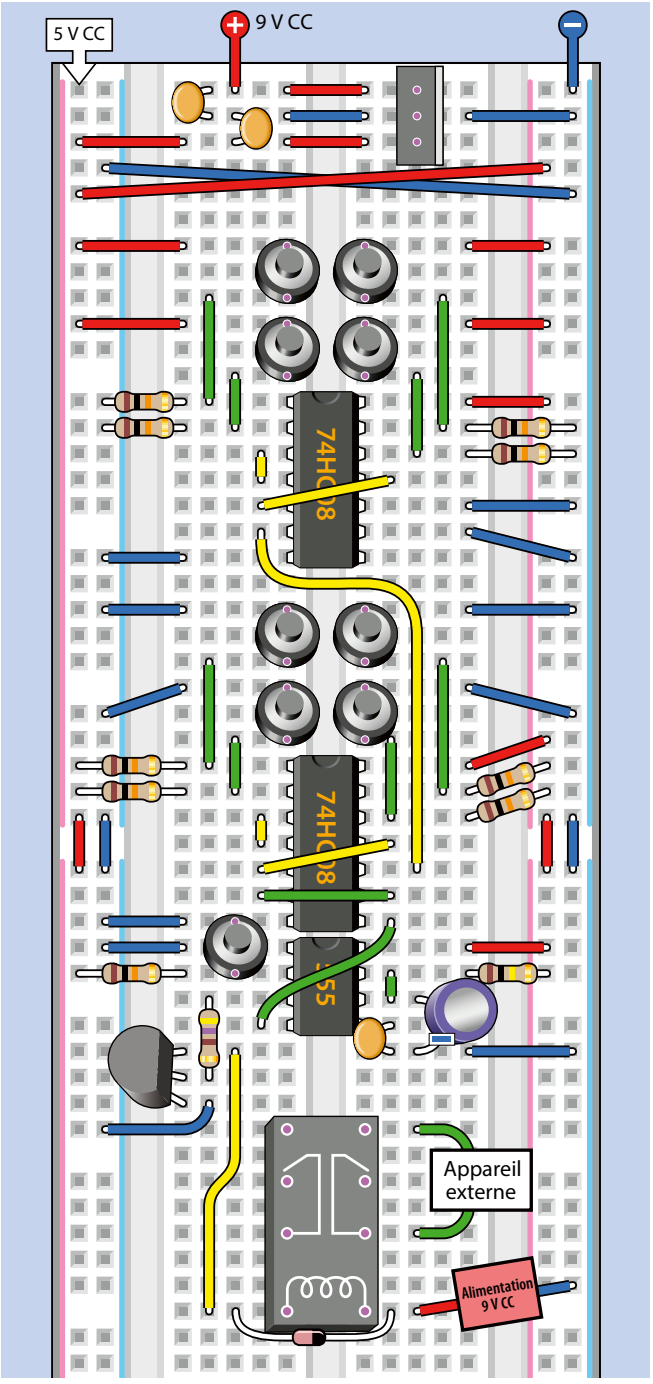
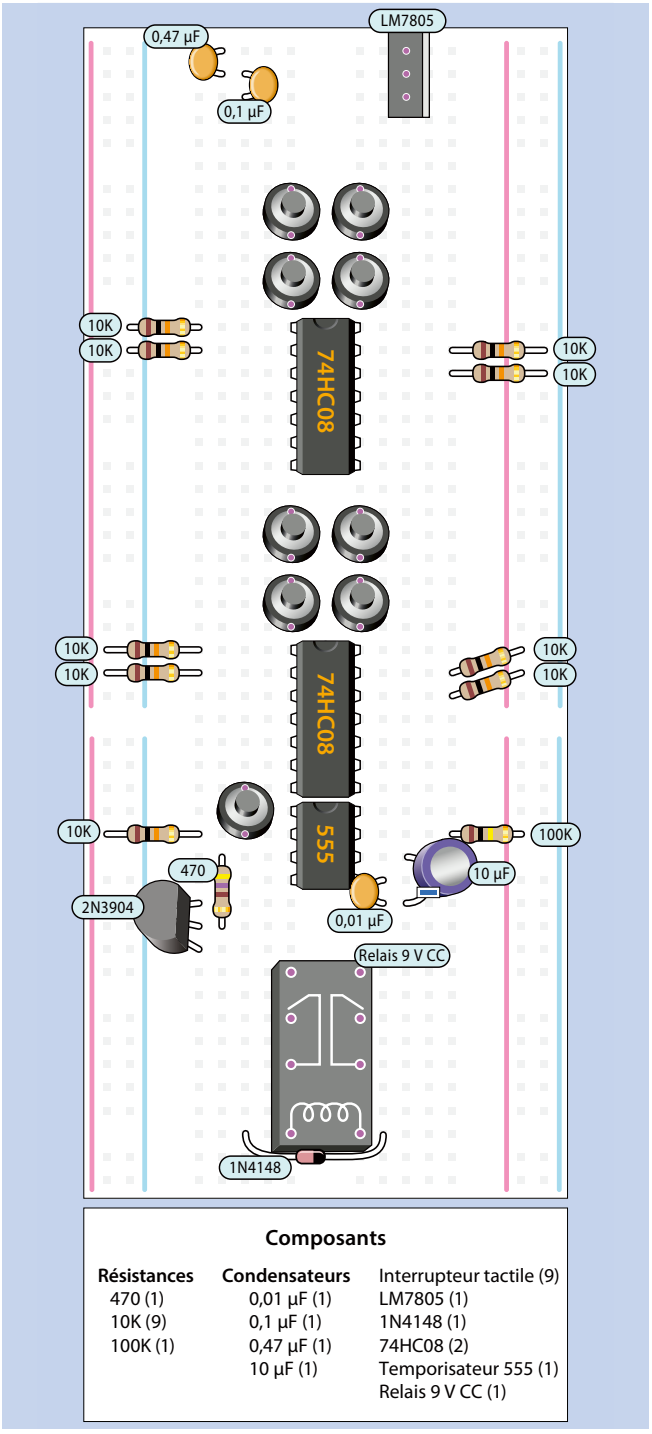


Figure 20-8. *Circuit complet du verrou électronique.*



Composants

Résistances	Condensateurs	
470 (1)	0,01 µF (1)	Interrupteur tactile (9)
10K (9)	0,1 µF (1)	LM7805 (1)
100K (1)	0,47 µF (1)	1N4148 (1)
	10 µF (1)	74HC08 (2)
		Temporisateur 555 (1)
		Relais 9 V CC (1)

Figure 20-9. *Plan du verrou électronique limité aux composants.*

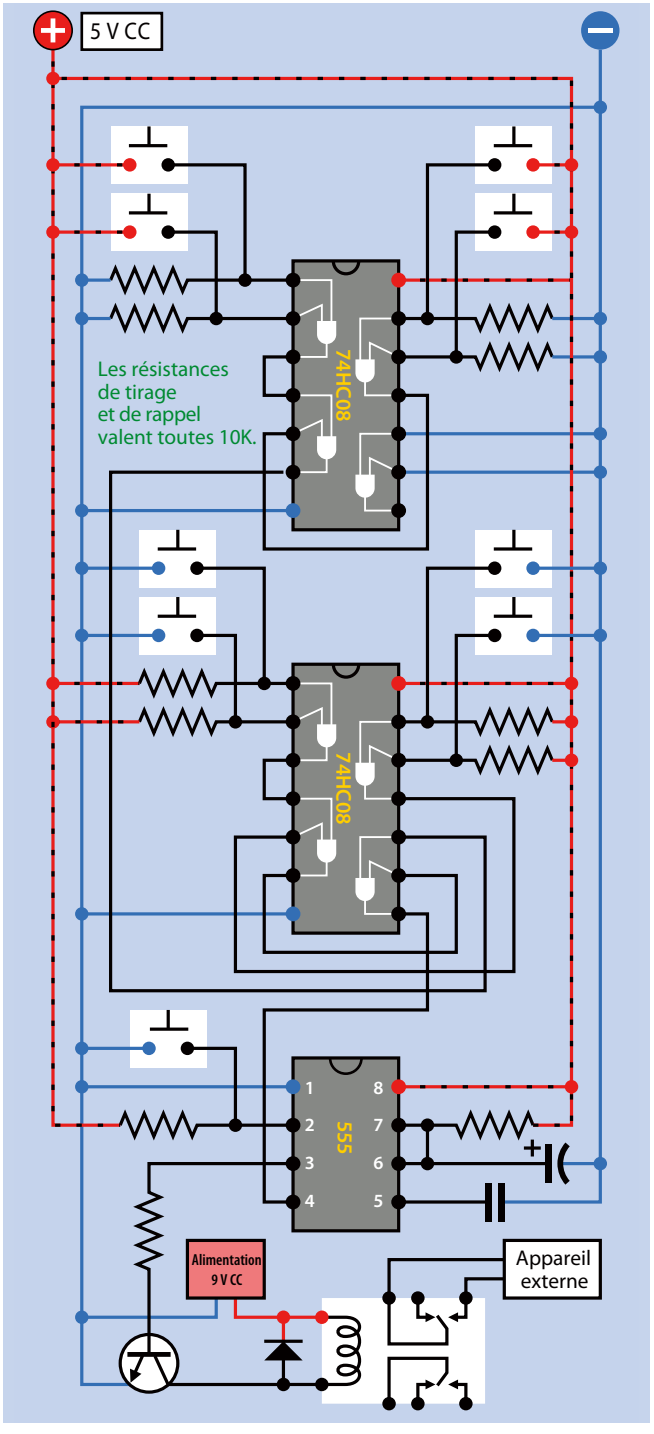


Figure 20-10. *Schéma du verrou électronique.*

La résistance de 100K et le condensateur de 10 µF reliés au temporisateur 555 permettent de générer une impulsion de trois secondes, qui correspond à ce dont a besoin le bouton de « mise en marche » d'un ordinateur. Si vous envisagez d'utiliser le verrou avec un autre appareil, il pourrait être nécessaire de modifier le circuit en utilisant un relais en mode bistable, c'est-à-dire dont l'état est maintenu tant que le verrou est alimenté.

Faites attention à maintenir l'alimentation 9 V séparée de l'alimentation 5 V fournie par le régulateur de tension. Je peux vous affirmer que les circuits intégrés logiques fonctionnant sous une tension de 5 V n'apprécieraient pas d'être alimentés par une tension de 9 V. Par contre, votre alimentation 9 V doit partager la masse avec l'alimentation de 5 V, sinon le transistor serait inopérant. Vous pouvez installer un long fil de pontage allant de l'arrivée de la tension de 9 V CC en haut de la plaque, jusqu'en bas, à la borne droite de la bobine du relais que j'ai repérée.

Vous pouvez remarquer que j'ai ajouté une diode sous la bobine du relais, orientée à l'opposé du sens conventionnel du courant. On l'appelle parfois ***diode de roue libre***, ou ***diode anti-retour***. Quand une tension est appliquée à une bobine, puis supprimée, la bobine génère une impulsion due à l'énergie qu'elle a stockée, ce qui peut endommager le composant qui la pilote, par exemple le transistor. La diode bloque le courant direct, mais elle absorbe le pic de tension inverse, au lieu que ce soit le transistor.

Quand des composants électroniques sensibles sont utilisés dans un circuit contenant une bobine, une diode anti-retour doit être utilisée par précaution.

Interfaçage avec l'ordinateur

Si vous souhaitez utiliser le verrou électronique avec un ordinateur, vous le faites à votre propre risque. Je ne le recommande pas, mais voici comment faire.

Assurez-vous d'abord que vous avez correctement câblé le circuit de votre verrou. Une seule erreur de câblage pourrait permettre au circuit de délivrer une tension de 9 V CC par le contact de gauche du relais, au lieu de simplement fermer un interrupteur. C'est important !

Voyons maintenant comment fonctionne votre ordinateur quand vous le mettez en marche. Dans les anciens ordinateurs, il y avait un gros interrupteur au dos du boîtier, situé sur une solide enceinte métallique qui renfermait les circuits transformant la tension du secteur électrique en diverses tensions nécessaires au fonctionnement de l'appareil. Les ordinateurs récents ne fonctionnent plus ainsi ; Ils restent reliés au secteur électrique en permanence, et un petit bouton-poussoir connecté à la carte mère, situé sur son boîtier (si c'est un PC Windows), ou sur son clavier (si c'est un Mac), permet de les mettre en fonctionnement.

C'est une situation idéale nous concernant, car nous n'avons pas à contrôler une tension élevée. Ne tentez jamais d'ouvrir l'enceinte métallique munie d'un ventilateur, située à l'intérieur de votre ordinateur, il s'agit de son alimentation. Cherchez le câble (contenant habituellement deux conducteurs, sur un PC Windows), qui relie le bouton de « démarrage » et la carte mère.

Tout d'abord, ***assurez-vous que votre ordinateur est bien débranché***. Ensuite, si possible, reliez votre corps à la terre. Puis cherchez le câble. Coupez l'un des deux conducteurs, et tentez de démarrer votre ordinateur. Si rien ne se passe, vous avez trouvé le bon câble. (Même si ce n'est pas le bon conducteur, il permet d'empêcher votre ordinateur de démarrer, c'est ce que nous voulons, vous pouvez donc l'utiliser.)

Rappelez-vous que vous n'allez pas introduire une quelconque tension dans ce fil. Vous allez simplement utiliser le relais comme interrupteur pour reconnecter le fil que vous venez de couper.

Vous ne devriez rencontrer aucun problème, si vous agissez dans le calme, procédez méthodiquement, et avez trouvé le conducteur qui démarre l'appareil.

Après avoir localisé le câble, et coupé l'un de ses conducteurs, laissez votre ordinateur débranché durant les étapes suivantes.

Dénudez les deux extrémités du fil que vous avez coupé, et soudez les fils d'un nouveau câble à deux conducteurs, comme le montre la figure 20-11, en prévoyant deux morceaux de gaine thermorétractable, pour isoler les soudures.

Reliez le nouveau câble au relais, en prenant soin de le connecter à la paire de contacts qui se ferment lorsque le relais est activé. Vous éviterez ainsi de déverrouiller votre ordinateur alors que vous pensiez le verrouiller.

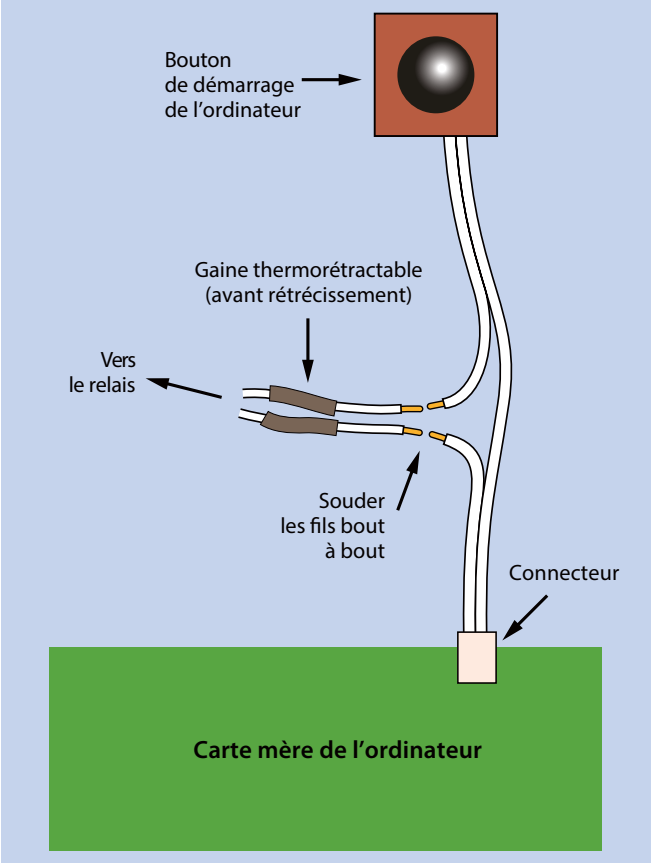


Figure 20-11. *Si vous souhaitez relier votre verrou électronique à votre ordinateur, voici ce qu'il faut faire.*

Branchez maintenant votre ordinateur et appuyez sur son bouton de « démarrage ». Si rien ne se passe, c'est bon signe. Appuyez maintenant sur les boutons de la combinaison secrète sur le clavier de votre verrou et essayez à nouveau le bouton « démarrage » dans les trois secondes pendant lesquelles le relais est activé. Le relais est connecté en série avec le bouton de l'ordinateur, ils doivent donc être tous les deux activés pour que le bouton agisse.

Installation

Après avoir testé votre circuit, il ne vous reste plus qu'à l'installer de façon permanente. N'oubliez pas de retirer le capot de l'ordinateur pour éviter de devoir l'endommager comme sur la figure 20-12.

Améliorations possibles

J'ai simplifié au maximum ce projet, ce qui laisse place à un grand nombre d'améliorations possibles pour le sophistiquer.

Ajouter des boutons. En supposant que la combinaison secrète consiste à appuyer sur la moitié des boutons installés, le nombre de combinaisons doublera approximativement pour chaque nouveau bouton installé. Il vous faudra évidemment vous procurer les puces ET nécessaires au traitement des nouveaux boutons. Le ferez-vous ?

Inclure des boutons fantômes. Vous pouvez installer des boutons qui ne sont pas reliés au circuit. Cela augmentera le nombre de combinaisons possibles, mais vous ne pourrez pas vérifier l'appui sur ces boutons.

Ajouter un compteur de tentatives infructueuses. Vous pourriez utiliser un circuit intégré compteur pour totaliser le nombre de tentatives de déverrouillage avec une mauvaise combinaison, et bloquer pendant un certain temps la possibilité de déverrouiller. Pour cela, il vous faudrait ajouter un compteur décimal dont les *sorties sont décodées*, c'est-à-dire qu'il posséderait 10 sorties devenant positives l'une après l'autre. Quand la sortie 3 ou 4 deviendrait positive, vous pourriez déclencher un temporisateur générant une impulsion de 30 minutes. Il faudrait modifier le câblage du circuit, afin de ne plus alimenter le bouton « déverrouillage » par le pôle négatif de l'alimentation, mais par la sortie du nouveau temporisateur au délai important. De cette façon, quand la sortie du temporisateur devient haute, le bouton de déverrouillage est inopérant. La seule difficulté serait de remettre le compteur à zéro. Vous pourriez peut-être ajouter un condensateur de couplage entre la sortie du nouveau temporisateur et la broche de réinitialisation du compteur, mais cela dépendra du niveau haut ou bas, activant la broche de réinitialisation du compteur utilisé.

Acheter un clavier numérique. Dans ma première édition de ce livre, je conseillais d'utiliser un clavier numérique pour ce projet. Certains lecteurs trouvaient cette option trop coûteuse, d'autres éprouvaient des difficultés à trouver un clavier adéquat. Cela reste une possibilité. Si vous souhaitez faire une telle acquisition, achetez un clavier dont chaque touche commande la fermeture d'une paire de contacts. Si vous choisissez un clavier à codage matriciel, son usage est prévu pour être associé à un microcontrôleur, il ne serait pas compatible avec le décodage par les portes ET.

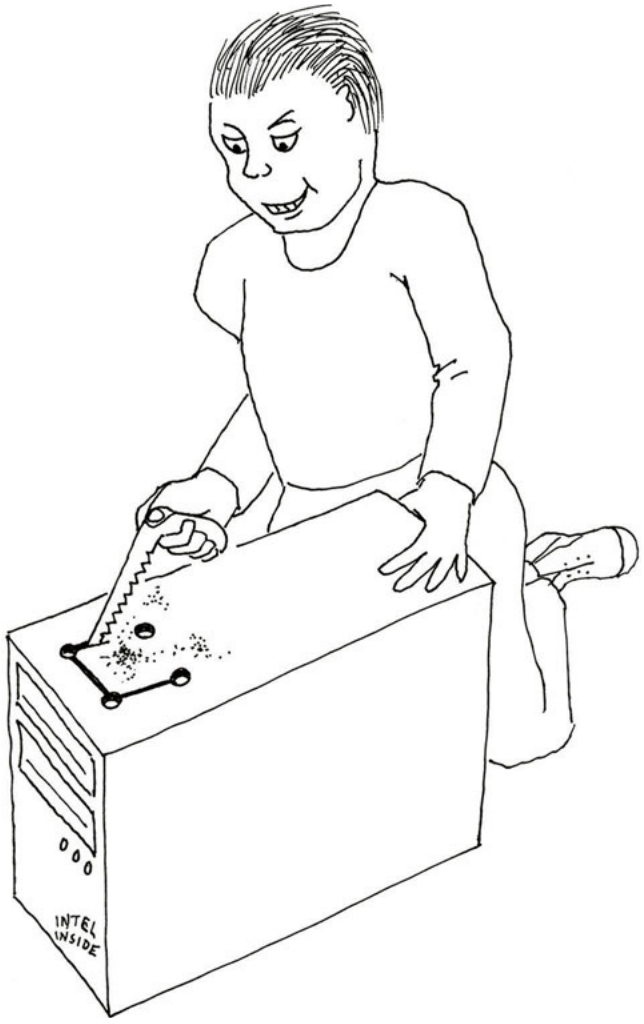


Figure 20-12. *Méthode d'installation non recommandée de votre verrou électronique.*

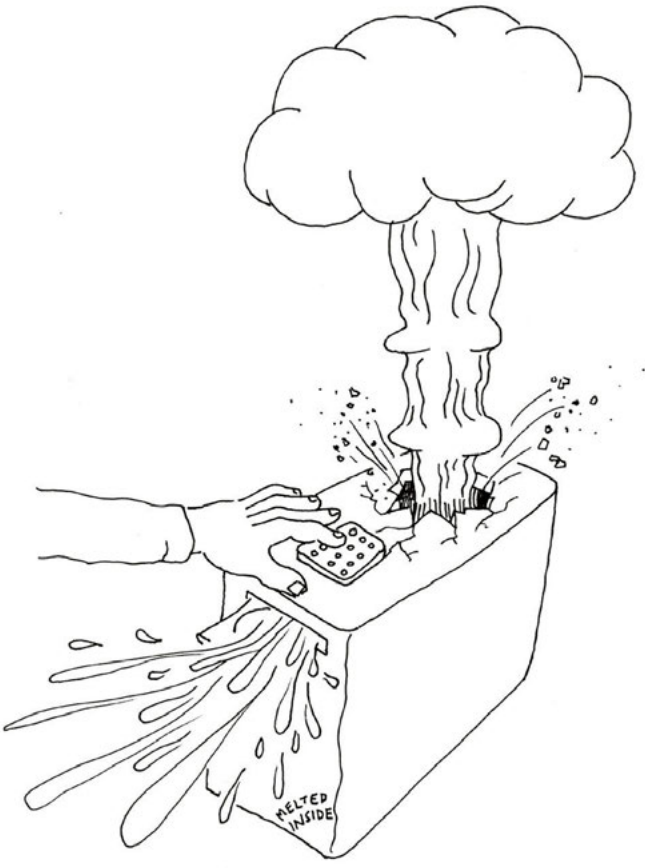


Figure 20-13. *Pour ceux qui seraient totalement paranoïaques, un système de sécurité par autodestruction, contrôlée par un code secret, procure une sécurité absolue des données.*

Protéger votre ordinateur. Pour rendre ce système plus sécurisé, vous pourriez équiper son boîtier de vis indémontables. Il vous faudrait évidemment acquérir également l'outil spécial qui leur correspond, vous permettant de les installer (ou de les retirer si vous deviez intervenir sur votre système pour une raison quelconque).

Permettre le changement du code. Autre option, ajouter un circuit permettant de changer le code secret quand vous le souhaitez. Cela sera difficile si vous réalisez la version définitive, soudée, de votre circuit, mais vous pourriez prévoir des connecteurs associés à des cavaliers permettant de modifier les liaisons des boutons-poussoirs. Vous pourriez également utiliser des *interrupteurs DIP*. Recherchez en ligne avec ces mots pour voir les différents modèles disponibles.

Sécurité destructive. Pour ceux qui seraient totalement paranoïaques, le problème pourrait être résolu en activant un second relais à haute intensité, quand quelqu'un entre un code invalide. Ce relais fournirait une forte surcharge électrique, à même de détruire votre CPU, et enverrait un important choc mécanique à votre disque dur, par l'intermédiaire d'un électroaimant qui y serait fixé, rendant ses données illisibles.

La destruction du matériel à des avantages certains par rapport à la protection des données par un logiciel. C'est plus rapide, difficile à contrer et définitif. De cette façon, si la « Haute Autorité pour la Diffusion des Œuvres et la Protection des droits sur Internet » vient chez vous pour vérifier le contenu de votre disque dur, fournissez-leur un mauvais code, asseyez-vous et attendez l'apparition de l'odeur âcre du plastique brûlé, ou des rayons gamma, si vous avez opté pour une solution nucléaire (voir la figure 20-13).

En étant plus réaliste, aucun système de protection n'est totalement sécurisé. La valeur d'un système de verrouillage matériel, quand quelqu'un parvient à le violer (par exemple en trouvant comment retirer les vis indémontables, ou simplement en retirant le clavier du boîtier de l'ordinateur en le découpant, à l'aide de pinces), est dans sa capacité à vous informer qu'une tentative infructueuse a eu lieu, par exemple en mettant une goutte de vernis ou de peinture sur la tête des vis indiquant qu'elles avaient été manipulées. En comparaison, si vous utilisez une protection par mot de passe et que quelqu'un échoue, vous ne saurez sans doute jamais que votre système a été forcé.

En voilà fini avec les mesures de sécurité des ordinateurs. La prochaine expérience va être un peu plus pratique.

Expérience 21
Une course de vitesse

Voici un autre projet utilisant des portes logiques, cette fois, nous allons imiter un quiz télévisé. Le circuit ne nécessite qu'une puce OU et deux temporisateurs, mais il met en évidence le concept du bouclage rétroactif, je pense que vous trouverez cela intéressant.

Vous aurez besoin de :

- 1 plaque d'essais, des fils de liaison, une pince coupante, une pince à dénuder, un multimètre
- 1 source d'alimentation de 9 V CC (pile ou adaptateur secteur)
- 1 circuit intégré logique à quatre portes OU à deux entrées 74 HC32
- 2 temporisateurs 555
- 1 interrupteur à glissière de type SPDT
- 2 interrupteurs tactiles
- résistances : 470 ohms (3), 10K (3)
- condensateurs : 0,1 µF (3), 0,47 µF (1)
- 1 régulateur de tension LM7805
- 3 LED génériques

Bouton de blocage

Quand je regarde un quiz télévisé, où les candidats s'affrontent pour être le premier à répondre à une question, je réfléchis au circuit électronique dissimulé quelque part, que j'appelle le bouton de blocage. Quand le joueur le plus rapide appuie sur un bouton, il bloque les autres joueurs. Quelques instants plus tard, l'animateur réinitialise le système pour la question suivante. Mais comment ?

J'ai trouvé des circuits, en ligne, qui le font. Mais certains sont trop simplistes, alors que d'autres me paraissent

un peu trop complexes. J'ai donc décidé de réaliser mon propre circuit, avec un « contrôle animateur » pour rendre le jeu plus réaliste. J'ai également prévu qu'il soit facilement extensible, afin de pouvoir supporter un nombre quelconque de joueurs.

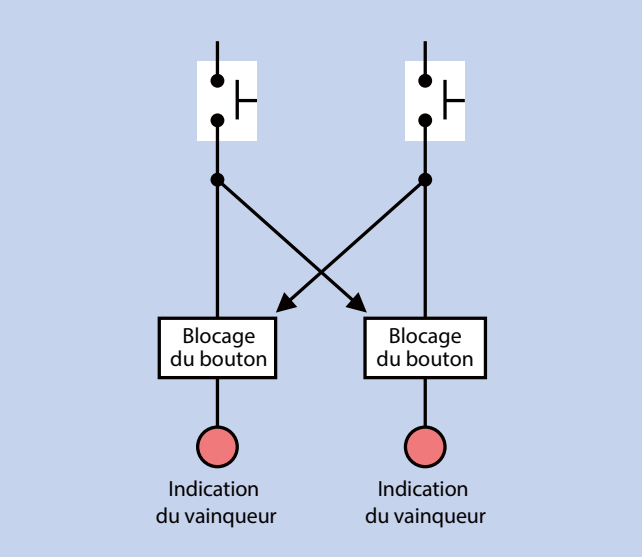


Figure 21-1. *Le premier joueur qui agit bloque le second.*

Essai conceptuel

Je vous rappelle tout d'abord les concepts de base : deux joueurs s'affrontent, chacun ayant à appuyer sur un bouton, et le bouton qui est activé en premier bloquera l'autre bouton.

Le dessin de la figure 21-1 en est l'illustration. La première personne qui appuie sur son bouton allumera un signal gagnant, mais il activera simultanément le circuit de blocage du bouton de l'autre joueur. J'ai dessiné des flèches pour représenter les relations dont je ne suis pas encore certain. La première étape consiste toujours à définir le problème.

Maintenant, en y réfléchissant, j'aperçois quelque chose que je n'aime pas. Supposons que je veuille que ce jeu supporte trois joueurs. Le bouton de chaque joueur doit maintenant activer le circuit de blocage de deux autres joueurs, et mon diagramme se complique, comme sur la figure 21-2.

Chaque circuit de blocage doit maintenant être capable de recevoir plusieurs entrées. En imaginant un jeu à quatre joueurs, la situation se complique encore davantage. À chaque fois que je rencontre ce type de difficulté, je me dis qu'il doit y avoir une meilleure solution.

Il y a un autre point pour lequel je suis inquiet. Après qu'un joueur aura relâché son bouton, les boutons des autres joueurs seront à nouveau débloqués. En fait, le bloqueur de bouton devra comporter un ***verrouillage,*** autrement dit une bascule (*latch* en anglais).

Hum. Et si la bascule remplissait deux fonctions ? Elle maintiendrait active la sortie du joueur gagnant, tout en supprimant les entrées en provenance de ***tous*** les boutons.

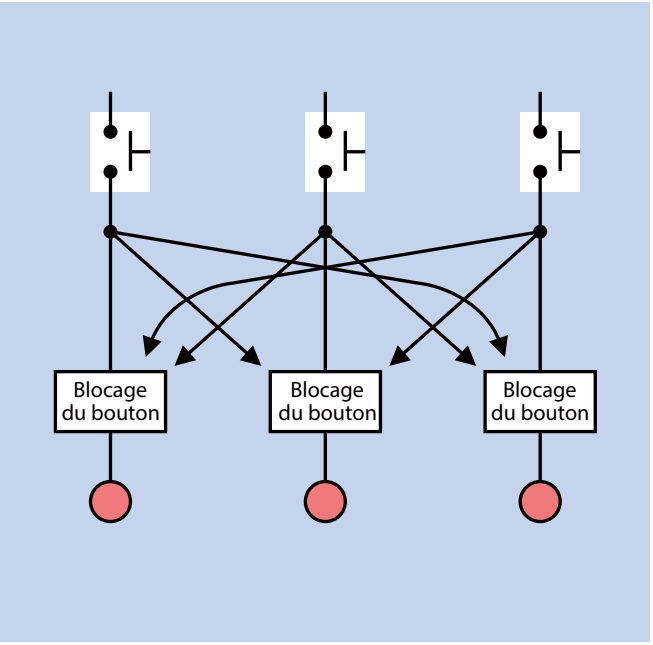


Figure 21-2. *La multiplication du nombre de joueurs engendre la complexité des interconnexions.*

Je peux résumer le tout de cette façon :

- Le premier joueur appuie sur son bouton.
- Son état gagnant est verrouillé.
- Le signal verrouillé est rebouclé et bloque tous les boutons.

La figure 21-3 montre ce concept. Au lieu d'avoir la présence de multiples connexions, il y a un ***bus de données*** desservant tous les joueurs. Cela devrait pouvoir être extensible, sans accroître la complexité. Un bus de données est identique à un bus d'alimentation mais il transmet des données.

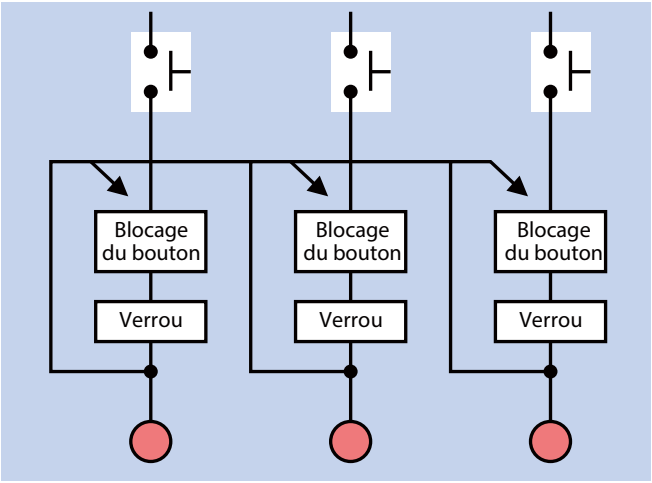


Figure 21-3. *Chaque verrou bloque maintenant tous les boutons.*

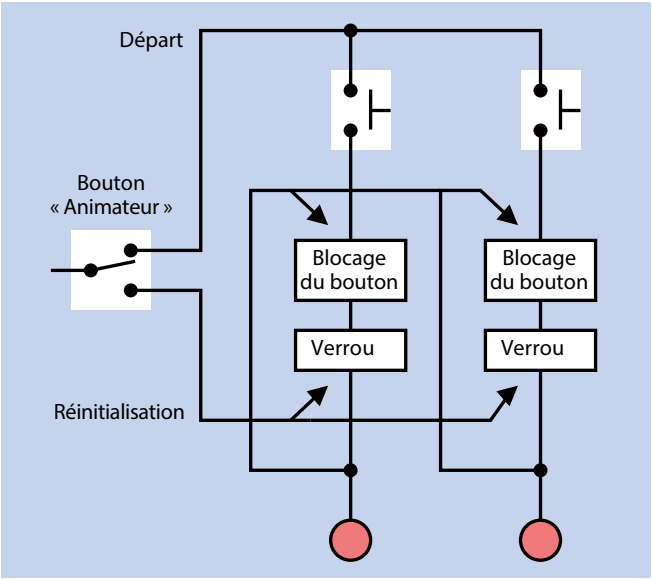


Figure 21-4. *Un bouton «Animateur» est ajouté pour démarrer chaque partie et réinitialiser chaque verrou après qu'un joueur a gagné.*

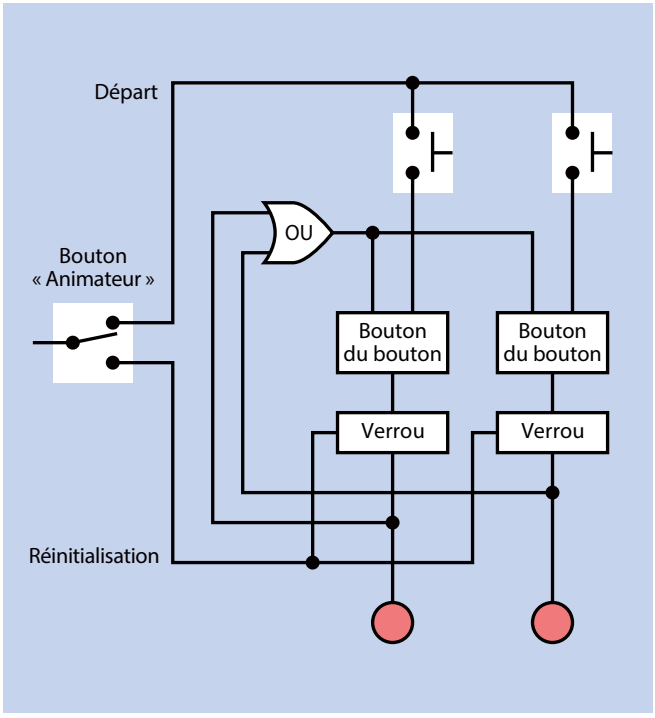


Figure 21-5. *Ajout d'une porte OU pour isoler le circuit de verrouillage de chaque joueur du circuit des autres.*

Quelque chose d'important manque : Un bouton de réinitialisation, permettant de remettre le système au point de départ, après qu'un joueur gagnant a été désigné. Le bouton de réinitialisation peut également avoir une position «Départ» permettant de réactiver les boutons des joueurs. Cela éviterait qu'un joueur puisse appuyer sur son bouton, avant que l'animateur ait fini de poser la question.

Pour couvrir ces besoins, sur la figure 21-4, j'ai ajouté un interrupteur à deux positions. L'espace limité me contraint à ne montrer que la version à deux joueurs, mais son concept demeure facilement extensible.

Soyons maintenant pragmatiques et supprimons les flèches. Les verrous seront réinitialisés ensemble, ce qui permet qu'une seule connexion en provenance de l'interrupteur de l'animateur leur soit reliée. Le bouclage rétroactif des circuits de blocage des boutons est un peu plus délicat, car il ne faut pas que la sortie de chaque verrou qui doit être rebouclée puisse activer les indicateurs de succès des

autres joueurs. Pour cela, j'ai ajouté une porte OU afin que les sorties des verrous soient isolées les unes des autres. Voir la figure 21-5.

Les portes OU courantes n'ont que deux entrées. Cela va-t-il m'empêcher d'ajouter d'autres joueurs ? Non, car on trouve des portes OU comportant jusqu'à huit entrées, ou vous pouvez empiler les portes OU comme sur la figure 20-5 dans le projet du Verrou électronique. Toutes les portes OU fonctionnent de la même façon : si une de leurs entrées est au niveau haut, leur sortie est au niveau haut.

Je dois maintenant décider comment le verrou doit fonctionner. Il me faut trouver une bascule disponible qui soit activée à la réception d'un signal, et désactivée par un autre signal, mais les circuits intégrés comportant des bascules offrent en général plus de possibilités que je n'en ai besoin dans un circuit aussi simple, et ils ont des sorties de faible puissance, comme la plupart des puces logiques. Je vous les présenterai dans la prochaine expérience, mais pour cette expérience, je vais à nouveau utiliser des temporisateurs 555. Ils nécessitent très peu de liaisons, fonctionnent de façon simple et peuvent fournir un courant suffisamment important pour piloter des LED brillantes.

Ce circuit va contenir deux temporisateurs 555 interagissant, je vous rappelle comment ils fonctionnent en mode bistable. Sur la figure 21-6, vous pouvez voir que lorsque la broche de réinitialisation est au niveau bas, la sortie est au niveau bas, quel que soit l'état de la broche de la gâchette. C'est exactement ce dont j'ai besoin pour le bouton de l'animateur du circuit de blocage du bouton.

Temporisateur 555 fonctionnant en mode bistable		
Broche de réinitialisation	**Broche de la gâchette**	**Broche de sortie**
Niveau bas	Ignorée	Niveau bas
Niveau haut	Transition descendante	Niveau haut
Niveau haut	Transition montante	Inchangée

Figure 21-6. *Fonctionnement du temporisateur 555 en mode bistable.*

Quand la broche de réinitialisation est au niveau haut, la broche de la gâchette du temporisateur peut le contrôler. Si la gâchette passe au niveau bas (transition descendante), elle met la sortie au niveau haut. Si la gâchette passe du niveau bas au niveau haut (transition montante), la sortie demeure inchangée, jusqu'à ce que la broche de réinitialisation la force à nouveau au niveau bas.

La seule chose qui ne me plaît pas dans ce comportement est que la broche de réinitialisation et la gâchette sont actives au niveau bas. Autrement dit, ils ont besoin d'un niveau bas pour réagir. Donc, le bouton-poussoir de chaque joueur devra fournir une impulsion négative, et quand un bouton n'est pas activé, il devra être muni d'une résistance de tirage pour maintenir son niveau haut. La figure 21-7 montre le début du circuit, comprenant l'interrupteur de l'animateur, également actif au niveau bas. J'utilise encore un format simplifié en indiquant les niveaux haut et bas du temporisateur par des ronds colorés. Si une broche n'est pas reliée, je ne la montre pas.

J'utilise toujours des flèches quand je suis indécis sur certains détails. Pour le premier joueur, je les ai identifiées par A et B, sachant qu'elles doivent d'une façon ou d'une autre, être reliées au point C, la gâchette du temporisateur. Je parie qu'une porte logique pourrait le faire. Mais quel type de porte ?

Je vais devoir y réfléchir. Quand l'interrupteur de l'animateur est en position de réinitialisation (orienté vers la gauche), le temporisateur 555 est réinitialisé, et sa sortie est forcée au niveau bas. L'interrupteur doit alors être basculé vers la droite pour démarrer une partie.

À ce point, les sorties des temporisateurs étant toujours au niveau bas, la sortie de la porte OU est également au niveau bas. Donc le point A est au niveau bas.

Je vais maintenant considérer uniquement la situation du premier joueur. Son bouton n'a pas encore été pressé, la résistance de tirage maintient un niveau haut au point B.

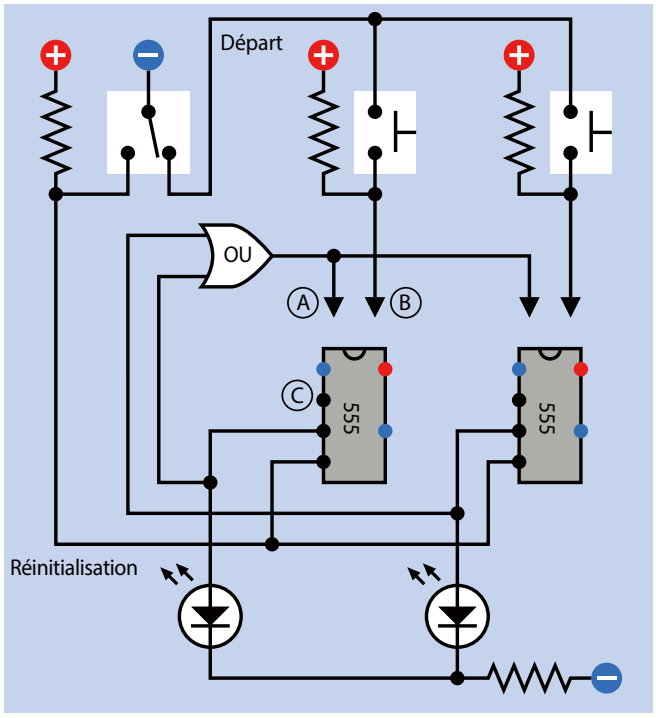


Figure 21-7. *Circuit simplifié utilisant des temporisateurs 555.*

Dans ces conditions, je ne veux pas que le 555 réagisse déjà, ses entrées doivent donc être au niveau haut. Cependant :

A est au niveau bas, B au niveau haut, C doit rester au niveau haut.

Le joueur 1 appuie maintenant sur son bouton. Sa sortie devient basse. Cela va déclencher le temporisateur en passant C au niveau bas. Donc :

A est au niveau bas, B au niveau bas, C passe au niveau bas.

Le temporisateur est déclenché, sa sortie passe au niveau haut. Elle retourne à la porte OU, cette porte a donc une entrée au niveau haut. Sa sortie passe au niveau haut, le niveau du point A devient haut également. Cela bloquera l'appui de tout autre bouton. Donc :

A est au niveau haut, B au niveau bas ou haut, C passe au niveau haut.

Je peux maintenant créer une table de vérité que vous pouvez voir sur la figure 21-8.

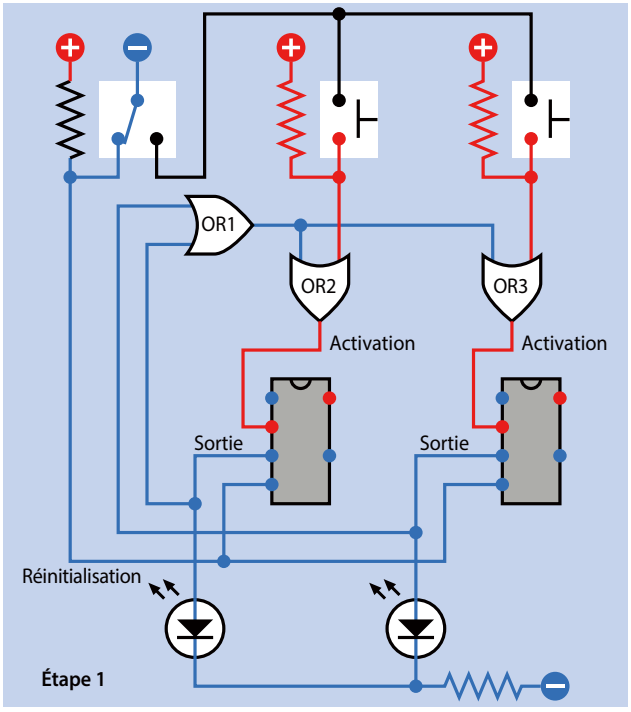
Point A (sortie de la porte OU)	Point B (venant du bouton-poussoir)	Point C (gâchette du temporisateur)
●	●	●
●	●	●
●	●	●
●	●	●

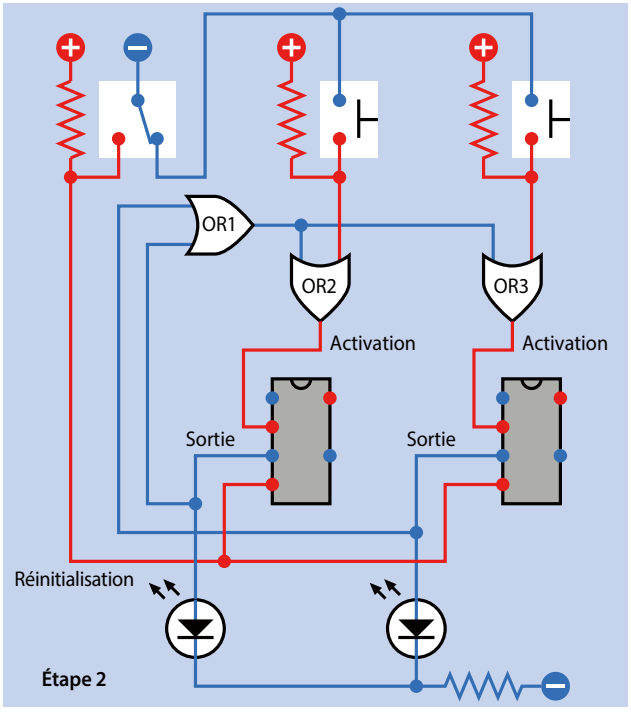
Figure 21-8. *Table de vérité des entrées du temporisateur de la figure 21-7.*

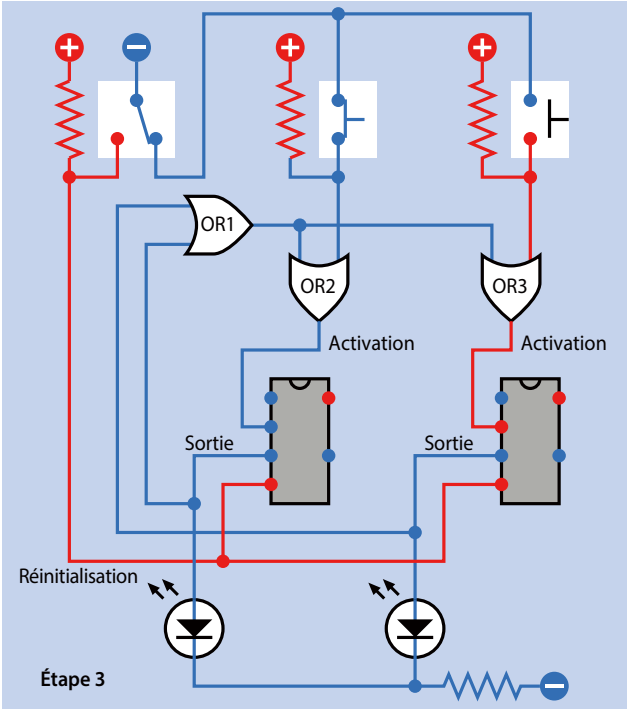
Comparez cette table de vérité avec celle à gauche de la figure 19-17, vous verrez que j'ai besoin d'une autre porte OU pour chaque temporisateur.

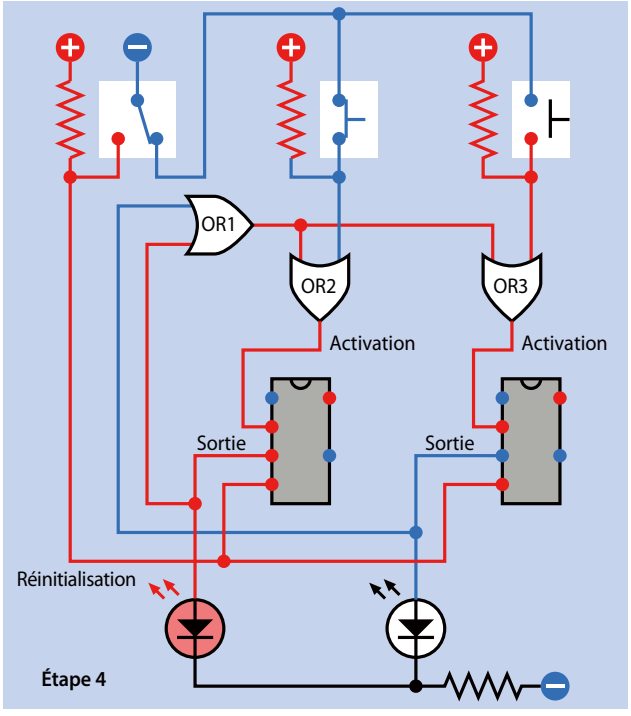
Ce circuit étant un peu délicat à comprendre, je vais le parcourir à nouveau avec vous en quatre étapes, en commençant par la figure 21-9. Elle montre la situation quand l'animateur a basculé son interrupteur en position « réinitialisation », forçant un niveau bas sur la broche de réinitialisation de chaque temporisateur. Quand les broches de réinitialisation sont au niveau bas, les sorties sont forcées au niveau bas. Les sorties sont rebouclées vers la porte OU de gauche, que j'ai nommée OR1. La sortie basse de OR1 est partagée par OR2 et OR3, mais la résistance de tirage attachée au bouton de chaque joueur maintient les autres entrées de OR2 et OR3, au niveau haut, leurs sorties maintiennent la gâchette de chaque temporisateur au niveau haut. Même si un joueur appuie sur un bouton-poussoir, l'interrupteur de l'animateur étant toujours en position de réinitialisation, les boutons-poussoirs n'ont aucun effet s'ils sont activés.

Figures 21-9 à 21-12 (de haut en bas et de gauche à droite). *Séquence des évènements se produisant quand aucun joueur ne peut jouer (étape 1), les boutons sont opérationnels (étape 2), le joueur 1 appuie sur son bouton (étape 3), la LED du joueur 1 s'allume, et le joueur 2 est bloqué (étape 4).*


OR1
OR2
OR3
Activation
Activation
Sortie
Sortie
Réinitialisation
Étape 1


OR1
OR2
OR3
Activation
Activation
Sortie
Sortie
Réinitialisation
Étape 2


OR1
OR2
OR3
Activation
Activation
Sortie
Sortie
Réinitialisation
Étape 3


OR1
OR2
OR3
Activation
Activation
Sortie
Sortie
Réinitialisation
Étape 4

À l'étape 2, l'animateur vient de poser une question, et il bascule son interrupteur vers la droite, afin d'alimenter les boutons (par un niveau négatif) des joueurs. Rappelez-vous qu'il s'agit d'un circuit actif pour un niveau bas. Une impulsion descendante provenant du bouton d'un des joueurs va déclencher un temporisateur. Aucun des joueurs n'a encore répondu, mais la résistance de tirage de l'interrupteur de l'animateur désactive la broche de réinitialisation de chaque temporisateur qui n'est plus bloqué. Un des temporisateurs peut maintenant être déclenché, aussitôt qu'un joueur appuie sur son bouton.

À l'étape 3, le joueur 1 a appuyé sur son bouton, envoyant un niveau bas à la porte OR2. Les deux entrées de OR2 sont maintenant au niveau bas, sa sortie passe au niveau bas. L'impulsion négative est transmise à la gâchette du temporisateur de gauche, mais les composants ne réagissent pas immédiatement, le temporisateur n'a pas encore traité le signal.

À l'étape 4, quelques microsecondes plus tard, le temporisateur a traité le signal de niveau bas et généré une impulsion montante sur sa sortie. Elle allume la LED et retourne vers OR1. OR1 a maintenant une entrée au niveau haut, sa sortie est également haute, car la sortie d'une porte OU est toujours positive si l'une de ses entrées est au niveau haut. Le niveau de sortie haut de OR1 est transmis aux entrées de OR2 et OR3 dont les sorties passent également au niveau haut. Ces sorties sont reliées aux gâchettes des temporisateurs, les niveaux bas qui pourraient être émis par les boutons-poussoirs sont maintenant ignorés. Les boutons ont été bloqués !

Rappelez-vous que quand la gâchette d'un temporisateur 555 passe du niveau bas au niveau haut, sa sortie demeure inchangée. En conséquence, la broche de sortie du temporisateur 1 reste au niveau haut, et la broche de sortie du temporisateur 2 reste au niveau bas.

Que peut-il se produire d'incorrect ?

Il n'y a qu'une situation qui puisse mettre en défaut le bloqueur de boutons. Que se passerait-il si les joueurs appuyaient sur leur bouton presque simultanément et que les composants électroniques étaient incapables de réagir suffisamment rapidement pour les différencier ? Les deux LED s'allumeraient avant qu'un temporisateur n'ait pu bloquer l'autre.

Dans les quiz télévisés, vous ne voyez jamais cela ! Absolument jamais ! Si les systèmes électroniques enregistrent une réponse simultanée des deux joueurs, pensez-vous qu'un dispositif en sélectionne un au hasard ? Ce n'est bien entendu qu'une spéculation. Mais si j'avais dû concevoir ce système, je l'aurais ajouté.

Réalisation sur une plaque de montage

Le plan de la plaque de montage est représenté sur la figure 21-13, et comme il y a peu de composants, je n'ai pas prévu le plan séparé ne comportant que les composants. Le schéma est représenté sur la figure 21-14.

Étant donné que je n'ai utilisé que des portes OU, au nombre de trois, vous n'avez besoin que d'une puce logique : le 74 HC32 qui contient quatre portes OU à deux entrées. Les deux portes en haut du circuit intégré seront OR2 et OR3 dans mon schéma simplifié, et la porte OU en bas et à gauche sera OR1, recevant la broche 3 de sortie de chaque temporisateur 555. Si vous disposez de tous les composants, vous devriez pouvoir assembler le tout en une heure environ. Pour le tester, commencez par basculer l'interrupteur vers le bas. Déplacez-le ensuite vers le haut, une LED doit indiquer aux joueurs qu'ils peuvent s'affronter, en appuyant sur leur bouton-poussoir. Vous pouvez essayer d'appuyer simultanément sur les deux boutons des joueurs, mais je parierai que le bloqueur des boutons réagira à un seul des deux et bloquera l'autre.

Vous remarquerez que j'ai ajouté un condensateur de 0,1 µF entre la broche 2 de chaque temporisateur 555 (la broche d'entrée), et la broche 1 (qui est reliée à la masse). Pourquoi ? Durant les tests, j'ai constaté qu'en l'absence de ces condensateurs un temporisateur se déclenchait parfois quand l'interrupteur de l'animateur était actionné, sans qu'aucun joueur n'ait appuyé sur son bouton. Je suppose que le temporisateur réagissait aux vibrations rapides des contacts de l'interrupteur à glissière quand celui-ci était actionné. Ce phénomène est appelé *rebond des contacts*, il s'est surement manifesté. Les condensateurs ont résolu le problème. Ils ralentissent un peu la réponse des temporisateurs, mais insuffisamment pour interférer avec les réflexes humains beaucoup plus lents.

En ce qui concerne les boutons des joueurs, leurs « rebonds » sont sans importance, car chaque temporisateur se verrouille de lui-même à la première impulsion

reçue, et ignore ce qui suit. Je reviendrai sur l'explication des rebonds des contacts, et comment s'en affranchir dans l'expérience suivante.

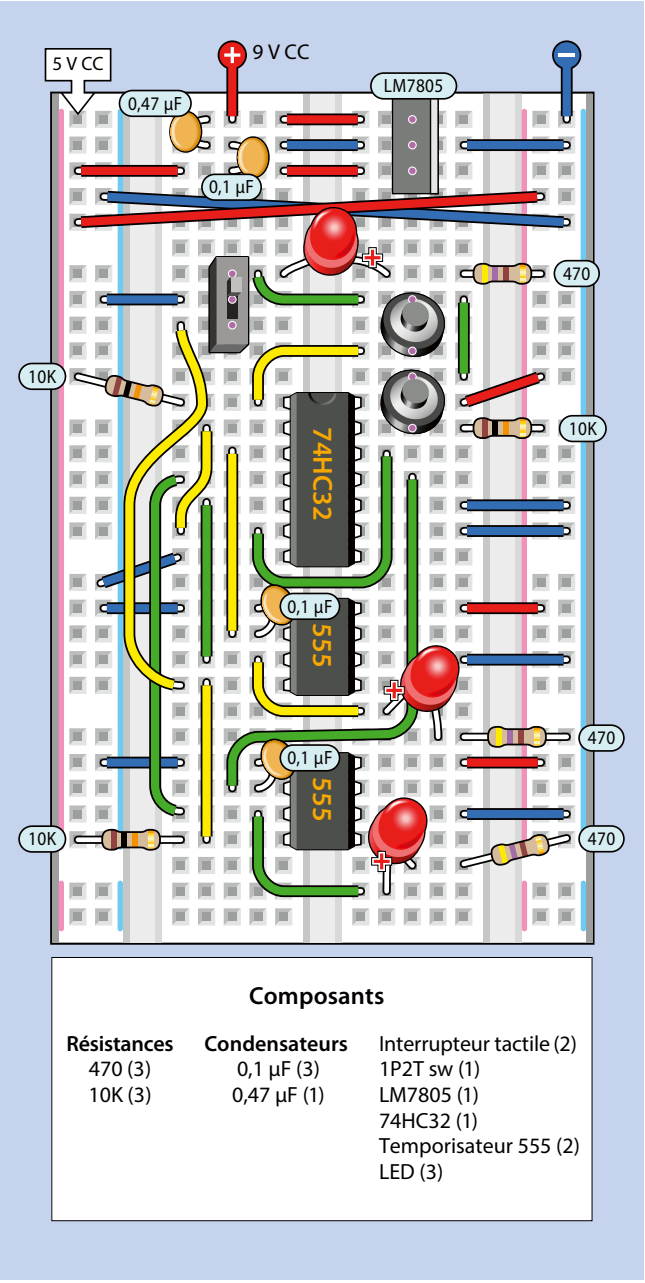


Figure 21-13. *Circuit complet du bloqueur de boutons sur une plaque de montage.*

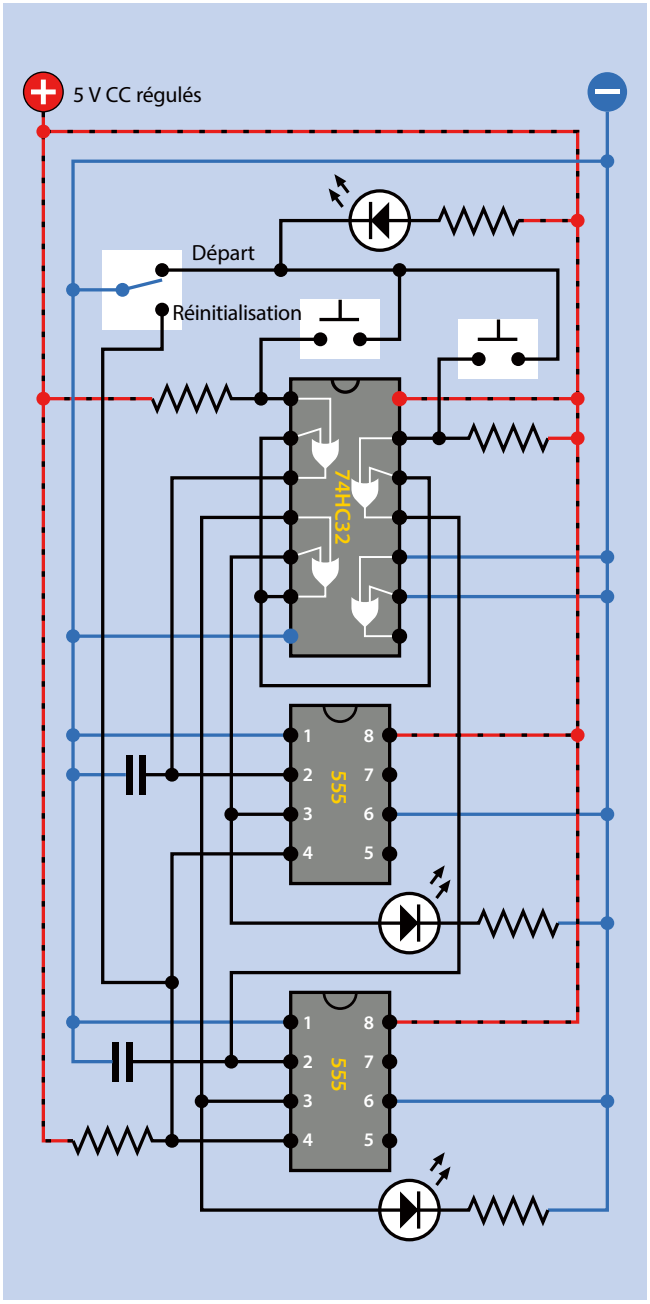


Figure 21-14. *Schéma du circuit bloqueur de boutons.*

Expérience 22
Commutation et rebonds

Dans trois des expériences précédentes, j'ai utilisé des temporisateurs 555 en mode bistable. Il est maintenant temps de découvrir les « vraies » bascules (flip-flop), et leur fonctionnement. Je vais également vous montrer comment elles peuvent traiter le phénomène que j'ai brièvement évoqué dans l'expérience précédente : les ***rebonds des contacts***.

Quand un interrupteur est actionné d'une position à l'autre, ses contacts vibrent très brièvement. Il s'agit des « rebonds » dont je parle, et qui peuvent poser des problèmes dans les circuits où des composants numériques sont si rapides qu'ils interprètent la moindre petite vibration comme un signal d'entrée séparé. Si par exemple, vous reliez un bouton-poussoir à un circuit intégré compteur, le compteur pourrait enregistrer dix impulsions, voire davantage, à chaque fois que l'interrupteur est activé. Un exemple de rebonds d'un interrupteur est montré sur la figure 22-1.

Il existe plusieurs techniques pour éliminer les rebonds d'un interrupteur, mais l'utilisation d'une bascule est probablement le plus fondamental.

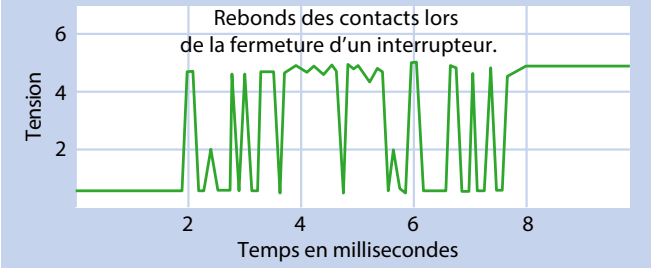


Figure 22-1. *Fluctuations créées par la vibration des contacts d'un interrupteur que l'on ferme (extrait d'une fiche technique de Maxim Integrated Corporation).*

Vous aurez besoin de :

- 1 plaque d'essais, des fils de liaison, une pince coupante, une pince à dénuder, un multimètre
- 1 source d'alimentation de 9 V CC (pile ou adaptateur secteur)
- 1 circuit intégré quadruple NON-OU à deux entrées 74 HC02
- en option, 1 circuit intégré quadruple NON-ET à deux entrées 74 HC00
- 1 interrupteur à glissière SPDT
- 2 LED génériques
- résistances : 1K (2), 10K (2)
- condensateurs : 0,1 µF (1), 0,47 µF (1)
- 1 régulateur de tension LM7805

Assemblez les composants sur votre plaque de montage selon la figure 22-2. Le 74 HC02 est une puce quadruple portes NON-OU à deux entrées. Si vous vous reportez à la figure 19-19, vous remarquerez que les portes NON-OU qu'il contient sont inversées, par rapport aux portes ET et OU des puces que vous avez utilisées. Il faut y faire attention quand vous le câblerez. Sur la figure 22-3, je les ai montrées dans une vue en transparence du circuit intégré.

À la mise sous-tension, une des LED du bas devrait s'allumer. En inversant la position de l'interrupteur, l'autre LED s'allumera.

Cela ne semble pas très intéressant, mais essayez maintenant quelque chose qui va vous surprendre. Retirez l'interrupteur de la plaque de montage, la LED qui était allumée, le reste. Réinsérez l'interrupteur et changez sa position, afin d'allumer l'autre LED, puis retirez à nouveau l'interrupteur, la LED reste allumée.

Voici ce qu'il faut retenir :

- Une bascule (flip-flop) n'a besoin que d'une impulsion initiale, par exemple, en provenance d'un interrupteur.
- À partir de là, elle conserve son état, jusqu'à ce qu'elle reçoive une entrée différente.

Antirebonds avec des portes NON-OU

Le plan de la plaque de montage de ce circuit est trop complexe pour comprendre son fonctionnement, c'est pourquoi j'ai imaginé une séquence simplifiée en quatre

étapes, sur la figure 22-4, pour expliquer les interactions entre les portes NON-OU. Pour vous rafraîchir la mémoire, sur la figure 22-5, j'ai représenté la table de vérité de la sortie d'une porte NON-OU, selon l'état de ses entrées.

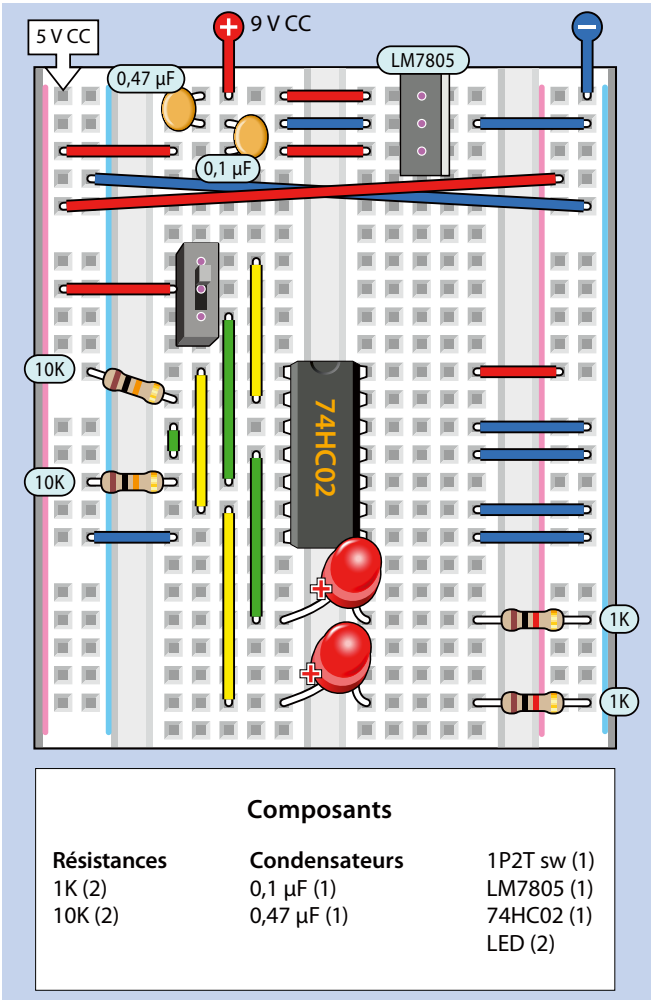


Figure 22-2. *Plan de la plaque de montage du circuit de la bascule (flip-flop) utilisant des portes NON-OU.*

Sur la figure 22-4, étape 1, l'interrupteur fournit, sur le côté gauche du circuit, un courant positif contrariant la tension négative de la résistance de rappel, ainsi nous pouvons être sûrs que la porte NON-OU de gauche a une entrée au niveau haut. Puisqu'une seule entrée au niveau logique haut de la porte NON-OU génère une sortie au niveau bas (selon la table de vérité de la figure 22-5), ce niveau est transmis à la porte NON-OU de droite dont les deux entrées sont maintenant au niveau bas, ce qui génère un niveau haut à sa sortie. Ce signal retourne à la porte NON-OU de gauche. Dans cette configuration, tout est stable.

Venons-en maintenant à l'étape 2, la partie intelligente de ce circuit. Supposons que vous actionnez l'interrupteur afin qu'aucun de ses contacts ne se touche, ou que ses contacts ont des rebonds et ne parviennent pas à obtenir un contact correct, ou que vous avez simplement déconnecté l'interrupteur. Sans recevoir un signal positif en provenance de l'interrupteur, l'entrée à gauche de la porte NOR de gauche passe au niveau bas en raison de la présence de la résistance de rappel. Mais l'entrée de droite de cette porte étant toujours au niveau haut, la sortie de cette porte reste négative, rien ne change. En d'autres termes, le circuit a échoué (flop) dans cet état, bien que l'interrupteur ait été déconnecté. (D'où provient le courant positif dans l'étape 2 ? De l'alimentation externe de la puce. Rappelez-vous que les portes logiques doivent toujours être alimentées.)

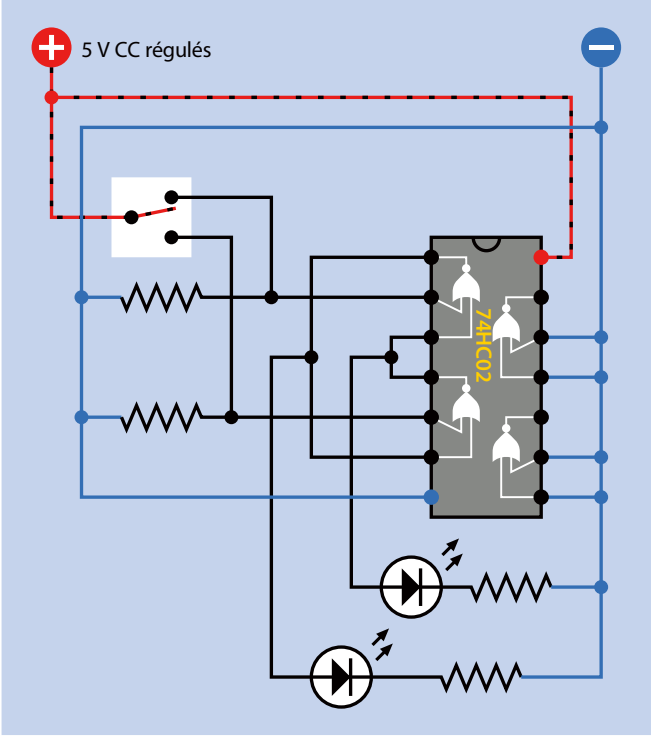


Figure 22-3. *Schéma du circuit de la bascule.*

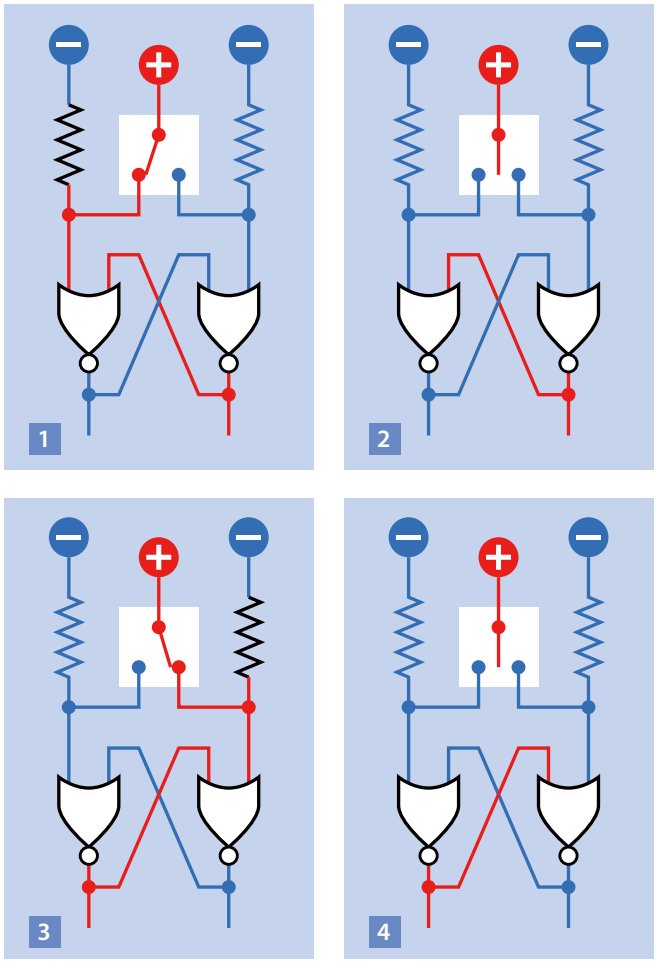


Figure 22-4. *Utilisation de deux portes NON-OU pour réaliser une bascule.*

Sur la figure 22-5, si l'interrupteur est positionné à droite, il fournit une tension positive à l'entrée à droite de la porte NON-OU qui l'interprète comme niveau logique haut et met sa sortie au niveau bas. Celle-ci est transmise à l'autre porte NON-OU dont les deux entrées sont maintenant au niveau bas, et dont la sortie passe au niveau haut et retourne à la porte NON-OU de droite.

De ce fait, le niveau des sorties des deux portes NON-OU change, on dit qu'ils ont basculé.

Que se serait-il passé si vous aviez appliqué un niveau d'entrée haut simultanément sur les deux portes ? Leurs sorties passeraient au niveau bas ce qui empêcherait la bascule de remplir son rôle qui est de mémoriser une sortie au niveau haut.

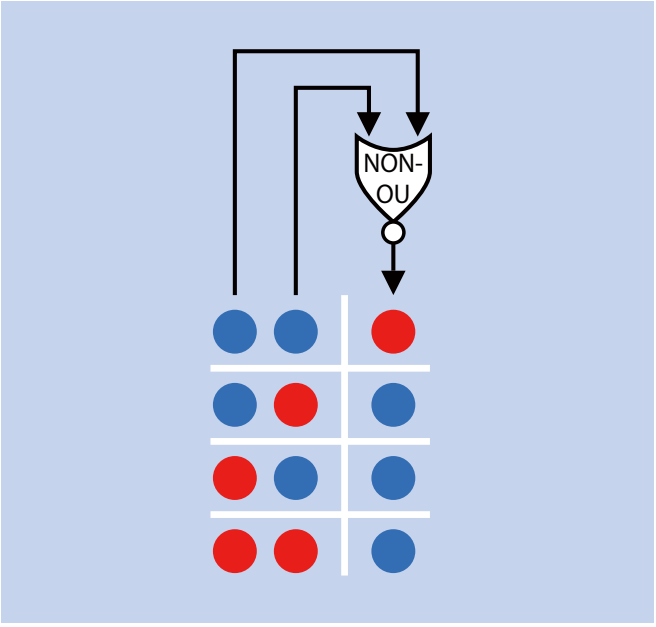


Figure 22-5. *Rappel de la table de vérité d'une porte NON-OU.*

C'est pour cela que j'ai utilisé un interrupteur à deux positions (ou inverseur). Au repos, une entrée d'un côté du circuit doit être au niveau haut, celle de l'autre côté, au niveau bas.

Les livres d'introduction à l'électronique que j'ai consultés ne mentionnent pas l'intérêt d'utiliser un interrupteur à deux positions. Quand j'ai commencé à apprendre l'électronique, je devenais fou en essayant de comprendre comment deux portes NON-OU pourraient supprimer les rebonds d'un interrupteur à une position, jusqu'à ce que je réalise que c'était impossible.

Antirebonds avec des portes NON-ET

La figure 22-6 illustre une séquence d'évènements similaire, mais inversée quand on utilise des interrupteurs reliés à la masse, et deux portes NON-ET. Pour vous rafraîchir la mémoire, sur la figure 22-7, j'ai représenté la table de vérité de la sortie d'une porte NON-ET, selon l'état de ses entrées.

Si vous souhaitez vérifier le fonctionnement d'une porte NON-ET, vous pouvez utiliser la puce 74 HC00 que j'ai incluse de façon optionnelle dans la liste des fournitures de cette expérience. Soyez toutefois prudent : les portes à l'intérieur d'un circuit intégré NON-ET ne sont pas disposées comme celles de la puce NON-OU. Les deux composants ne sont pas interchangeables, vous devrez changer la position de certaines connexions sur votre plaque de montage.

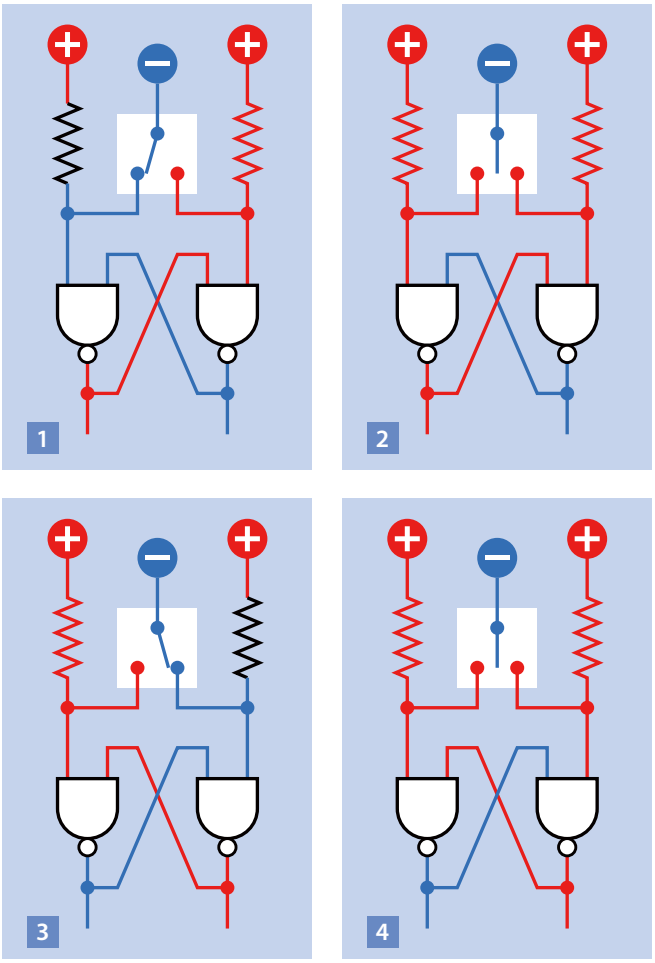


Figure 22-6. *Utilisation de deux portes NON-ET pour réaliser une bascule.*

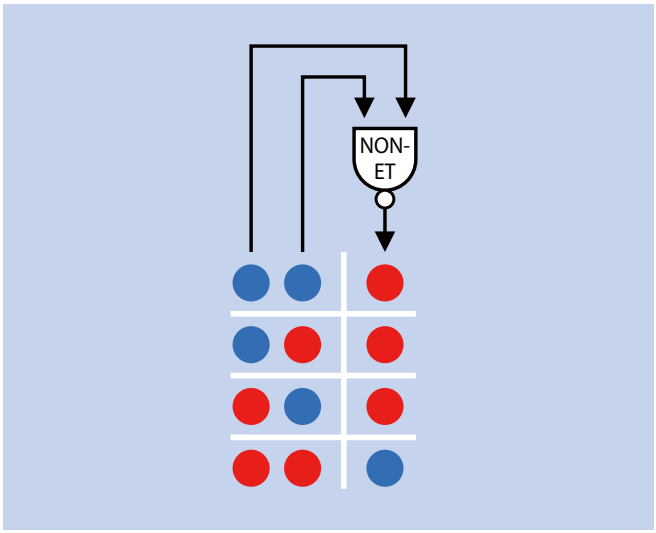


Figure 22-7. *Rappel de la table de vérité d'une porte NON-ET.*

Circuit asynchrone et circuit synchrone

Les circuits composés de portes NON-OU et NON-ET sont un exemple de *circuits asynchrones*, appelés ainsi car l'interrupteur les force à répondre immédiatement et à sauter d'un état à l'autre. Vous pouvez utiliser ce circuit à chaque fois que vous souhaitez éliminer les rebonds d'un interrupteur (s'il s'agit d'un interrupteur inverseur).

Une version plus sophistiquée du circuit utilise des *bascules synchrones*, qui exigent de définir au préalable l'état de chacune de leurs entrées avant de leur envoyer un signal d'horloge pour provoquer la réaction de la bascule. L'impulsion d'horloge doit être très propre et précise, ce qui signifie que si vous la générez grâce à un interrupteur, vous devrez supprimer ses rebonds avec un autre circuit à bascule synchrone ! Si vous souhaitez en apprendre davantage au sujet des bascules, vous pouvez vous reporter à *L'électronique en pratique 2*.

Comment supprimer les rebonds d'un interrupteur ou d'un bouton-poussoir non inverseur ? En fait, c'est un vrai problème ! Une des solutions consiste à utiliser un circuit intégré spécialisé pour cette fonction, comme le 4490 « éliminateur de rebonds », qui contient un circuit retardateur numérique. Une référence spécifique est le MC14490 de On Semiconductor. Ce circuit intégré contient six circuits

pour six entrées séparées, chacune possédant une résistance de tirage. Il est cependant particulièrement coûteux : environ 10 fois le prix d'un 74 HC02 contenant des portes NON-OU.

Vous pouvez, bien entendu, toujours utiliser un temporisateur 555 connecté en mode bistable. Il peut supprimer les rebonds de tout type d'entrée (en provenance d'un interrupteur ou d'un bouton-poussoir), car vous pouvez lui adjoindre une résistance de tirage sur la broche 2 qui recevra un niveau bas en provenance de l'interrupteur. Le 555 réagira au premier pic de tension, et ignorera les rebonds qui pourraient subvenir ensuite.

Ma préférence pour cette possibilité a maintenant plus de sens. C'est plus facile ainsi.

Expérience 23
Les dés magiques

Les circuits électroniques simulant le jet de dés existent depuis très longtemps. Cependant, j'ai une motivation supplémentaire pour en inclure un ici : c'est l'opportunité d'expliquer le système binaire, langage universel utilisé par tous les calculateurs numériques.

Vous aurez besoin de :

- 1 plaque d'essais, des fils de liaison, une pince coupante, une pince à dénuder, un multimètre
- 1 source d'alimentation de 9 V CC (un adaptateur secteur est préférable, car ce circuit consomme davantage de courant qu'une pile peut fournir)
- 1 temporisateur 555
- 1 circuit intégré quadruple porte ET à deux entrées 74 HC08
- 1 circuit intégré triple porte NON-OU à trois entrées 74 HC27
- 1 circuit intégré quadruple porte OU à deux entrées 74 HC32
- 1 compteur binaire 74 HC393
- 2 interrupteurs tactiles
- résistances : 470 ohms (6), 1K (4), 10K (2), 100K (1)
- condensateurs : 0,01 µF (2), 0,1 µF (2), 0,47 µF (1), 10 µF (1), 100 µF (1)
- 1 régulateur de tension LM7805
- 14 LED génériques, de diamètre 3 mm de préférence

Technique : le compteur binaire

Au cœur de tous les circuits de dés électroniques, il y a toujours un circuit intégré compteur. Il s'agit souvent d'un *compteur décimal* possédant 10 sorties « décodées »,

passant en séquence au niveau haut, une à la fois. Un dé ne possède que six faces, mais si vous reliez la sortie 7 du compteur à son entrée de réinitialisation, il redémarrera après avoir compté jusqu'à six.

J'aime bien faire les choses différemment et je veux vous apprendre le système binaire, je vais donc utiliser un compteur binaire. Celui que j'ai choisi est le 74 HC393. Son brochage est indiqué sur la figure 23-1, vous verrez qu'en réalité, il contient deux compteurs. J'ai utilisé le préfixe 1 pour identifier le premier compteur, et 2, pour identifier le second, bien que je ne l'utiliserai pas avant d'avoir ajouté un deuxième dé au circuit, à la fin de ce projet.

Test du compteur

Cette puce possède quelques fonctions simples que vous pouvez observer en la testant. Le plan de la plaque de montage le permettant est représenté sur la figure 23-2, son schéma sur la figure 23-3.

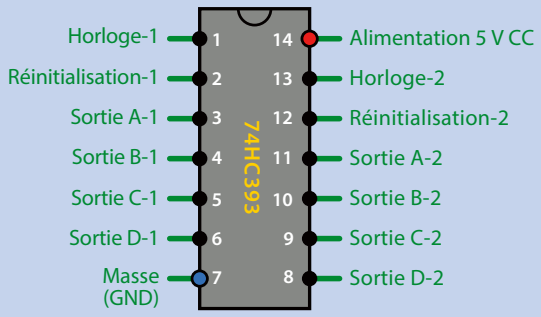
> *Rappelez-vous qu'il s'agit d'un circuit intégré logique fonctionnant sous 5 V CC, ne retirez pas le régulateur de tension.*

Avec les résistances et le condensateur que je préconise, le temporisateur fonctionne à une fréquence voisine de 0,5 Hz vous permettant de visualiser les signaux délivrés par sa sortie. Si vous observez minutieusement, vous verrez que la ***fin*** de l'impulsion positive sur la LED reliée au temporisateur, correspond au ***début*** de chaque impulsion envoyée à la LED en bas et à droite. Cela est dû au fait que le compteur est ***déclenché par un front descendant***, c'est-à-dire qu'il réagit quand une impulsion d'entrée passe du niveau haut au niveau bas.

Notez que j'ai ajouté un condensateur de découplage de 0,1 µF entre l'alimentation et la masse, près de la broche 8 du temporisateur. Cela permet de supprimer les petits pics de tension que le temporisateur a tendance à générer, et qui dépassent la limite de 5 V imposée par les puces 74xx, risquant ainsi de réduire leur durée de vie. Ne serait-il pas plus sensé de placer ce condensateur à la sortie du temporisateur 555, si c'est elle qui génère les pics de tension ? Oui, mais si vous le faites, le compteur risque de réagir de façon aléatoire, car le condensateur amortira également les fronts descendants de la fin des impulsions. Rappelez-vous que ce compteur a besoin du front descendant pour réagir, mais si vous ajoutez un condensateur à la sortie du temporisateur, le front descendant rapide sera transformé en un signal en pente douce que le compteur pourrait ne pas reconnaître correctement. En étant connecté à la broche d'alimentation du temporisateur, le condensateur absorbe les pointes de courant que le temporisateur transforme en pics de tension à sa sortie.

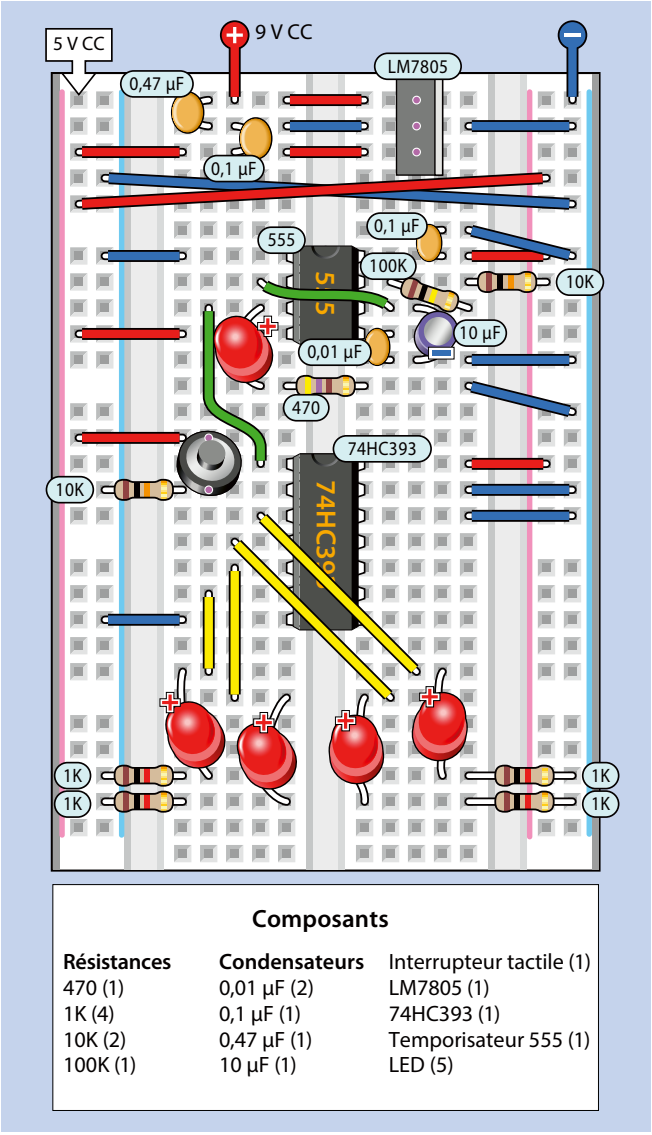
Si vos connexions sont correctement établies, les quatre LED représentées sur la figure 23-4 vont s'allumer selon une séquence allant de 0 à 15. Les ronds rouges indiquent une LED allumée. Les chiffres 0 et 1 ont été ajoutés, car la valeur 1 est souvent affectée à un niveau haut, tandis que 0 se réfère à un niveau bas dans les circuits intégrés de calcul. Ces 0 et 1 sont appelés des ***chiffres binaires*** ou ***bits***.

Je vais maintenant vous donner davantage d'explications concernant le calcul décimal et binaire. Avez-vous à connaître cela ? Oui, c'est utile. Les circuits intégrés tels que les décodeurs, les encodeurs, les multiplexeurs et les registres à décalage utilisent le système binaire, tout comme l'ordinateur sur lequel je saisis ce texte.



Le 74HC393 contient deux compteurs de 4 bits identifiés A, B, C et D, A étant le bit le moins significatif. Chaque compteur a sa propre entrée d'horloge que le front descendant fait avancer (passage du niveau haut au niveau bas). Pour chaîner le compteur 2 avec le compteur 1, la sortie D de ce compteur doit être reliée à l'entrée d'horloge du compteur 2. Les broches de réinitialisation et les sorties ont un niveau actif haut.

Figure 23-1. *Brochage du 74 HC393. Le chiffre 1 se reporte au premier compteur, le chiffre 2 au second.*



Composants

Résistances	Condensateurs	
470 (1)	0,01 µF (2)	Interrupteur tactile (1)
1K (4)	0,1 µF (1)	LM7805 (1)
10K (2)	0,47 µF (1)	74HC393 (1)
100K (1)	10 µF (1)	Temporisateur 555 (1)
		LED (5)

Figure 23-2. *Plan de la plaque de montage du circuit montrant la sortie et la fonction de réinitialisation d'un compteur binaire 74 HC393.*

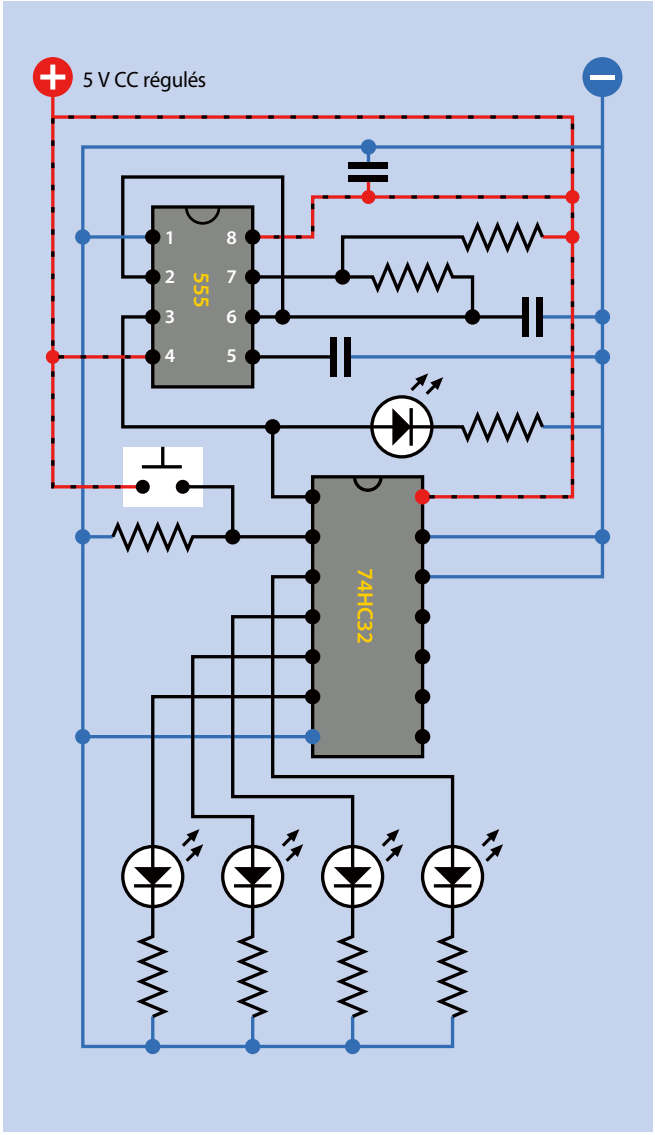


Figure 23-3. *Schéma du circuit de test du compteur.*

Figure 23-4. *De bas en haut, séquence des niveaux des sorties d'un compteur binaire à quatre bits.*

Fondamentaux : le code binaire

Suivez de haut en bas la séquence de la figure 23-4, et essayez de comprendre la logique. Pour commencer, la sortie A passe de `0` à `1`, mais si le compteur doit s'incrémenter à nouveau, il a un problème car il n'y a pas de chiffre 2 en notation binaire. On ne dispose que de deux états électriques : le niveau haut et le niveau bas représentant le 0 et le 1. Ainsi, sur la ligne 1, quand le compteur passe à la ligne 2 du diagramme, il transmet la valeur `1` à la colonne immédiatement à sa gauche, et repasse à `0`.

Ce comportement se répète à l'infini, et toutes les colonnes comptent de façon identique. La règle peut s'énoncer de la façon suivante :

Commencer par `0`

Ajouter `1` à `0` pour donner `1`.

Si vous ajoutez 1 à nouveau, décalez-le sur la gauche et revenez à la valeur `0`. En arithmétique binaire `01 + 01 = 10`.

On peut comparer cela à la façon dont on compte en arithmétique décimale. Quand vous incrémentez le comptage et atteignez la valeur 9, si vous ajoutez 1, comme il n'y a pas de chiffre supérieur à 9, vous placez la valeur 1 dans la position suivante à gauche, et le chiffre le plus à droite revient à `0`. En d'autres termes, en système décimal, `09 + 01 = 10`. Si les circuits des ordinateurs avaient dix états possibles, ils pourraient compter comme nous ; mais ils ne sont pas conçus ainsi.

Chaque ligne de 4 chiffres sur la figure 23-4 représente un *nombre binaire* à 4 bits. Sa valeur décimale est indiquée dans la colonne de gauche.

Que se passe-t-il quand le compteur 74 HC393 atteint la valeur 1111 ? Puisqu'il s'agit d'un compteur à quatre bits, il repasse automatiquement à la valeur `0000` et recommence ainsi indéfiniment.

La LED la plus à droite représente le *bit le moins significatif* d'un nombre binaire à quatre bits. La LED la plus à gauche représente *bit le plus significatif*.

Front montant ou front descendant

Je vous ai dit que le compteur réagissait à un front descendant : il passe à la valeur suivante quand la tension de son signal d'horloge passe du niveau logique haut au niveau bas. (Dans l'expérience 19, vous avez utilisé un compteur qui réagissait à un front montant. Le type à utiliser dépend de l'application et des compteurs disponibles.)

Le 74 HC393 possède également une broche de réinitialisation (similaire à celle de la puce 4026B de l'expérience 19).

Certaines fiches techniques nomment la broche de réinitialisation «master reset Pin» c'est-à-dire broche de réinitialisation globale, abrégée MR.

Certains fabricants appellent la broche de réinitialisation «Clear» que l'on peut traduire par «effacement», abrégée CLR sur leur fiche technique.

Quelle que soit son appellation, la broche de réinitialisation aura toujours la même fonction consistant à forcer les sorties du compteur au niveau bas, c'est-à-dire à la valeur binaire **0000**.

La broche de réinitialisation nécessite une impulsion séparée. Mais réagit-elle à un front descendant, comme la broche d'horloge ? Nous allons le déterminer.

Sur la figure 23-3, vous pouvez observer que la broche 2 du temporisateur qui est la broche de réinitialisation est maintenue au niveau bas par une résistance de rappel de 10K. Il y a également un bouton-poussoir qui peut relier directement cette broche au bus d'alimentation positif. Cela contrarie l'action de la résistance de 10K, et porte la broche de réinitialisation au niveau haut.

Dès que vous appuyez sur le bouton-poussoir, toutes les LED s'éteignent et restent éteintes tant que vous maintenez votre appui. La fonction de réinitialisation du 74 HC393 est activée et maintenue par un front montant générant un niveau haut.

Le modulo

Retirez l'alimentation du circuit, je vais vous montrer comment faire compter le 74 HC393 jusqu'à un nombre plus petit. Je pense que ce sera utile dans le projet de simulation d'un dé.

Commencez par déconnecter la résistance de rappel et l'interrupteur tactile de l'entrée de réinitialisation (broche 2 du compteur).

Modifiez ensuite le câblage selon la figure 23-5, où le fil de pontage vert relie les broches 2 et 6 du compteur. La figure 23-6 montre la modification sur le schéma.

Faites à nouveau fonctionner le compteur. Il compte de **0000** jusqu'à **0111**, comme précédemment. La prochaine valeur devrait être **1000**, mais dès que le quatrième bit passe de **0** à **1**, son niveau haut est perçu par la broche de réinitialisation qui force le compteur à revenir à la valeur **0000**.

Pouvez-vous voir le clignotement de la LED la plus à gauche, avant que le compteur ne soit réinitialisé ? J'en doute, car le compteur réagit en moins d'un millionième de seconde.

Puisque compter de **0000** à **0111** en binaire équivaut à compter de **0** à **7** en décimal (c'est-à-dire huit pas), nous avons maintenant un compteur *divisant par huit*, ou compteur *octal*.

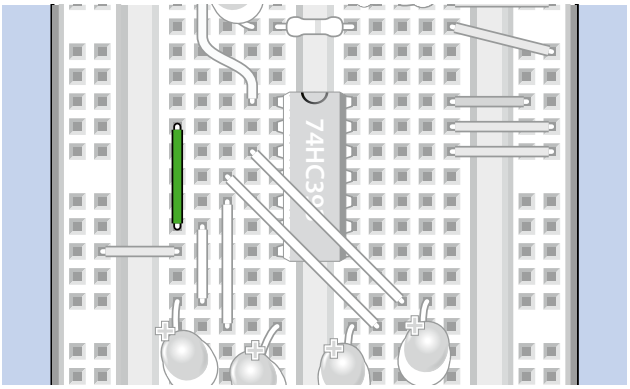


Figure 23-5. *Le fil de pontage vert a été ajouté. La résistance de rappel et le bouton-poussoir ont été retirés.*

Précédemment, nous avions un compteur *divisant par seize*, c'est-à-dire un compteur *hexadécimal*. Souvenez-vous que le compteur part de **0** et qu'il recommence quand il atteint la valeur décimale **7**, il répète ce cycle après huit incrémentations.

Supposons que vous déplaciez l'extrémité inférieure de votre fil de réinitialisation du quatrième vers le troisième chiffre. Vous auriez alors un compteur *divisant par 4*.

Vous pouvez facilement câbler un compteur binaire à quatre bits pour qu'il se réinitialise après deux, quatre, ou huit impulsions.

Le nombre maximum d'impulsions qu'un compteur peut décompter avant de repasser à la valeur 0 s'appelle le *modulo*, souvent abrégé «mod». Un compteur mod 8 recommence son cycle toutes les huit impulsions.

Conversion au modulo 6

Parfait, mais pour simuler un dé, ne serait-il pas préférable que le compteur puisse compter six impulsions, au lieu de huit ?

Oui, bien sûr, mais je devais vous montrer cette modification simple, avant de passer à celle, plus complexe, permettant de compter six impulsions.

En code binaire, les six premières valeurs sont les suivantes : **000, 001, 010, 011, 100, 101**. (Je peux ignorer le bit le plus significatif de la colonne D, car je ne l'utilise pas pour les six valeurs.) Je dois obtenir la réinitialisation du compteur quand ses sorties atteignent la valeur décimale **5**, c'est-à-dire la valeur binaire **101**.

(Dans ce projet, il serait plus facile que le compteur commence par la valeur **1** au lieu de **0**, mais il ne le peut pas.)

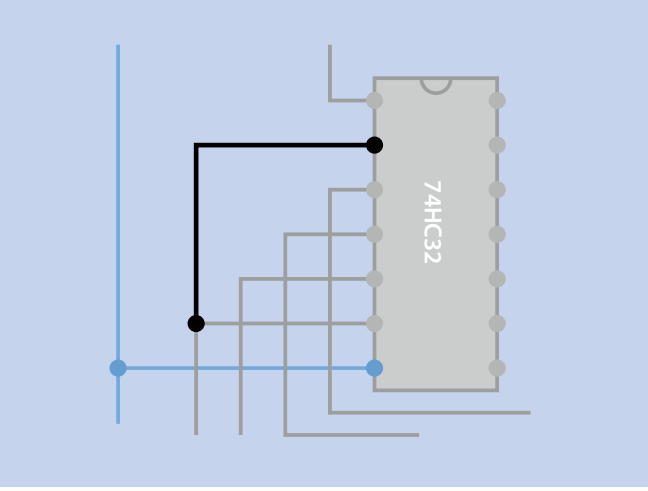


Figure 23-6. *Modification identique du schéma du circuit.*

Quelle est la valeur binaire de sortie qui vient après **101** ? La réponse est **110** en binaire.

Y a-t-il quelque chose de particulier en **110** qui n'était pas apparu précédemment dans le comptage ? Regardez la figure 23-4, vous verrez que la valeur binaire **0110** est la première d'une série dans laquelle les sorties C et B contiennent la valeur 1.

Dès lors, comment dire au compteur « quand tu as un 1 en C et un 1 en B, réinitialise ta valeur à **0000** » ? Le mot « et » dans cette phrase est un indice. Une porte ET a sa sortie au niveau haut quand, et seulement quand, ses deux entrées sont au niveau haut. C'est exactement ce dont j'ai besoin.

Puis-je utiliser une puce ET ici ? Absolument ! Tous les composants de la famille 74 HCxx sont conçus pour être reliés entre eux. C'est ce qui est agréable quand on conçoit des circuits logiques : il n'y a pas besoin de beaucoup d'autres composants.

Sur la figure 23-7, vous verrez comment ajouter une porte ET. Pour le faire sur votre plaque de montage, vous devrez ajouter une puce 74 HC08, que vous avez déjà utilisé. Il contient quatre portes ET, une seule sera utilisée, par la suite j'en utiliserai plusieurs quand j'ajouterai le second dé au projet.

Entre-temps, rappelez-vous de ceci :

> *Vous pouvez utiliser des circuits intégrés logiques avec un compteur, pour modifier son modulo en recherchant une configuration distinctive de ses sorties, et en réinjectant un signal à sa broche de réinitialisation.*

Pas d'afficheur à 7 segments

Pour afficher le dé, je pourrais utiliser un afficheur numérique à 7 segments qui compterait de 0 à 6, mais je ne veux pas faire ainsi, car ce n'est pas visuellement attractif. Je préfère utiliser 7 LED disposées de sorte à imiter les points d'un dé selon la séquence de la figure 23-8.

La question est maintenant la suivante : Y a-t-il un moyen simple de convertir la sortie binaire du compteur de façon à allumer les LED en respectant cette séquence ?

En fait, je ne sais pas exactement si c'est facile ou non, mais il doit y avoir une façon de le faire en utilisant des puces logiques. Une partie de la réponse est illustrée sur la figure 23-9. Sur la gauche se trouve la séquence des états des sorties A, B et C quand le compteur s'incrémente de **000** à **101**. Sur la droite, se trouve la séquence des configurations des points d'un dé.

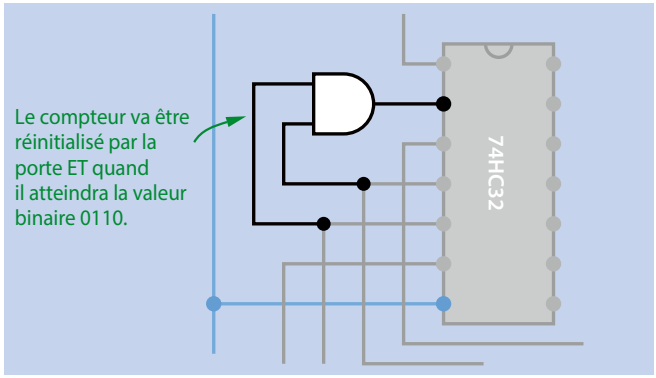


Figure 23-7. *Une porte ET ajoutée à cet endroit va forcer le cycle du compteur à compter six fois au lieu de 16.*

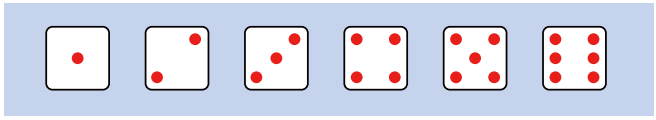


Figure 23-8. *Séquence de configuration des points d'un dé reproduite par des LED.*

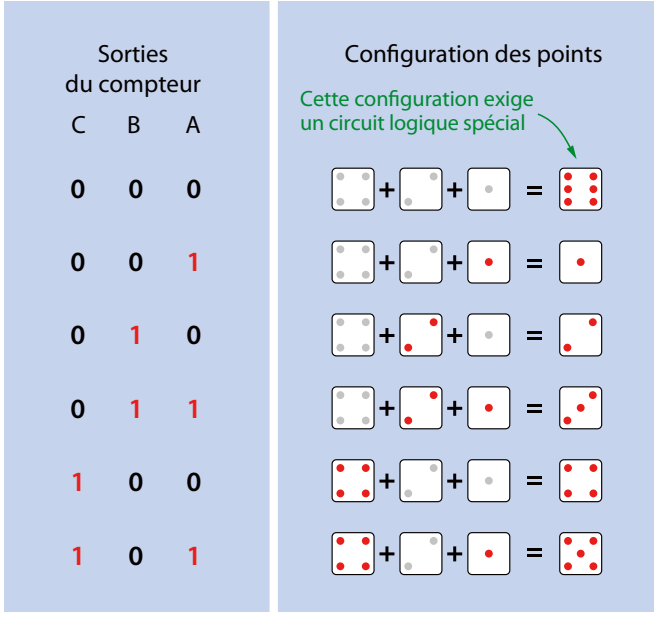


Figure 23-9. *Analyse de la conversion des sorties d'un compteur en points d'un dé.*

Première constatation : si vous pilotez le point central par la sortie A, la séquence est respectée.

Considérez maintenant les deux points en diagonale. Si vous les pilotez par la sortie B, la séquence est également respectée, à l'exception de la valeur **000** qui pose problème. J'y reviendrai dans un instant.

Si vous pilotez les deux autres points en diagonale par la sortie C et que cette sortie pilote également les deux premiers points en diagonale, cela permet de traiter les configurations quatre et cinq.

Et maintenant, comment considérer la configuration de la valeur six ? Le compteur part toujours de la valeur **000**, je dois donc convertir cette valeur d'une façon ou d'une autre, afin d'allumer les six LED. C'est un cas particulier qui nécessite un circuit logique particulier. C'est dommage, mais il n'y a pas d'autre possibilité. Je vais devoir utiliser une porte NON-OU à 3 entrées pour traiter ce cas.

Le schéma complet se trouve sur la figure 23-10. Je vais maintenant l'examiner de haut en bas.

La sortie A du compteur est simplement reliée au point central. Facile !

La sortie B allume les deux points en diagonale à l'aide de la porte OR2, et ces deux LED sont reliées en série. Pouvez-vous réellement connecter deux LED en série ? Oui, mais il faut adapter en conséquence, la valeur de leur résistance de protection. En fait, le circuit sera plus efficace ainsi, car une plus petite valeur de la résistance suffira.

Pourquoi OR2 est utilisé ici ?

C'est parce que les deux points en diagonale sont allumés par la sortie B, OU par la sortie C.

D'accord, mais pourquoi la sortie C est reliée au travers d'une autre porte OU nommée OR1 ? Parce que les quatre points situés aux coins du dé doivent être allumés par la sortie C, OU, dans le cas particulier, la valeur **000** qui doit allumer les six points.

La porte NON-OU à 3 entrées détecte la sortie **000** du compteur et allume les deux LED du milieu, elle demande également à OR1 d'allumer les deux LED en diagonale. OR1 demande à OR2 d'allumer les LED de l'autre diagonale, c'est ainsi que j'obtiens la configuration des six points.

Au cas où ce ne serait pas clair, j'ai créé la séquence des états haut et bas du circuit quand le compteur s'incrémente de **000** à **101**. Voir à ce sujet les figures 23-11, 23-12 et 23-13.

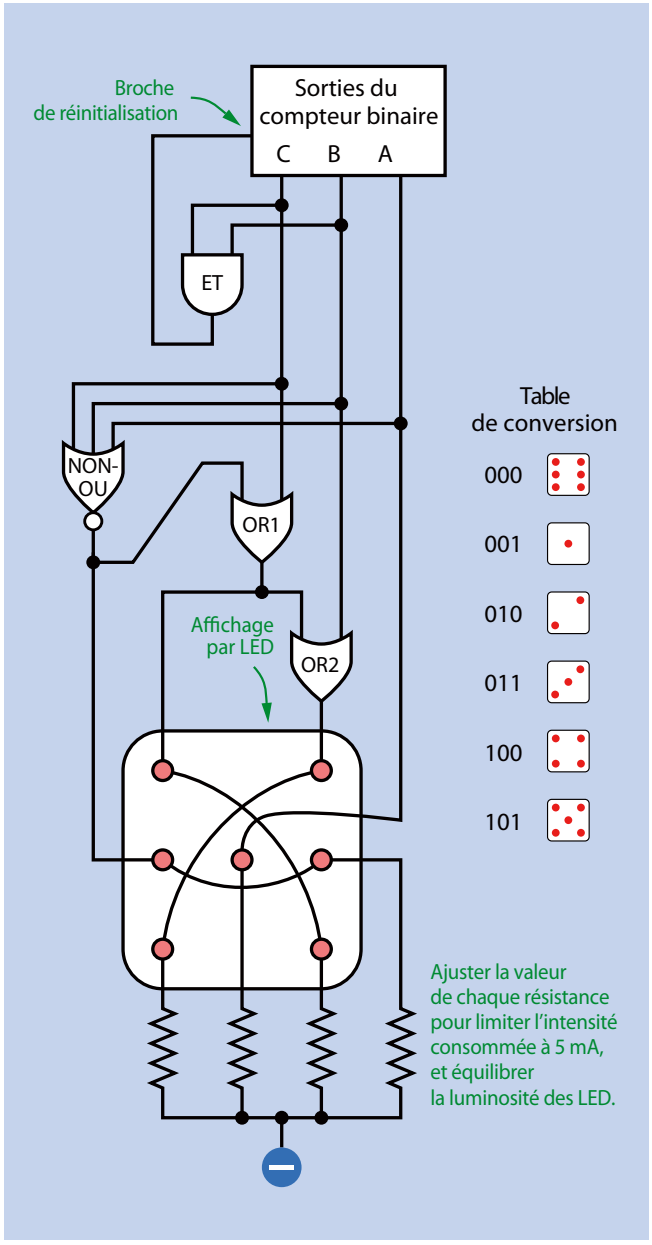


Figure 23-10. *Diagramme logique montrant comment les sorties du compteur peuvent provoquer l'allumage des points d'un dé.*

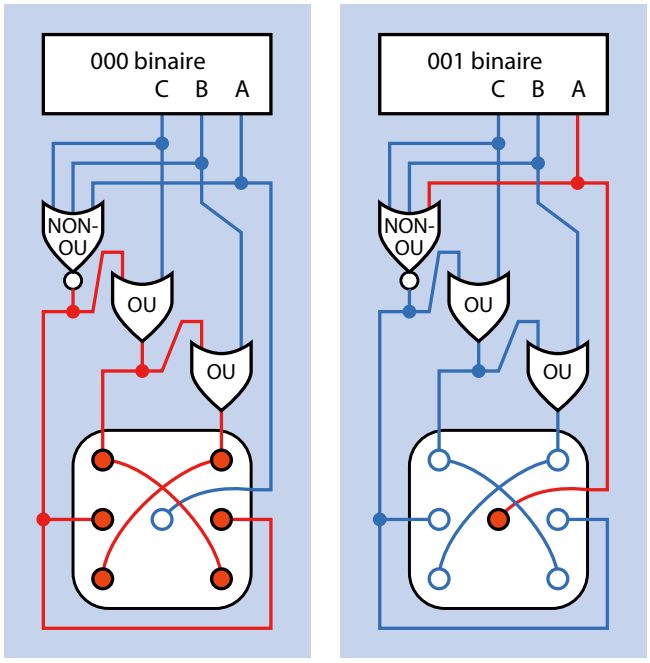


Figure 23-11. *Conversion en points des valeurs 000 et 001 du compteur.*

Quand on me demande quelle est la meilleure façon de concevoir un ensemble de portes logiques à même de résoudre un problème, je ne sais pas vraiment quoi répondre. Pour moi, c'est une succession d'essais et de modifications, mais il y a également une part intuitive. J'essaie quelque chose, note les différents états logiques, puis j'essaie autre chose, et ainsi, tôt ou tard, j'aboutis à une configuration qui répond à mes attentes.

Je sais qu'il existe des systèmes permettant de générer des diagrammes logiques, mais selon mon expérience, ils ont tendance à utiliser davantage de portes et sont moins efficaces. J'en reste donc à mon approche intuitive, je regrette de ne pas pouvoir fournir un meilleur conseil en la matière.

Ajout du deuxième dé

Je vais créer un circuit permettant la simulation de deux dés, les puces utilisées pour la simulation d'un seul dé contiennent assez de circuits ET, OU et NON-OU inutilisés pour le traitement du second dé. Vous n'avez besoin que des sept LED additionnelles et quelques fils de

pontages. Le plan de la plaque de montage se trouve sur la figure 23-14 et le schéma correspondant sur la figure 23-15. Vous remarquerez qu'il est impossible d'utiliser la même disposition des composants que sur la figure 23-12, car il y a deux nouveaux boutons-poussoirs, les composants fixant le timing ont des valeurs différentes, et les broches du 74 HC393 sont reliées différemment. Il serait préférable que vous réalisiez le circuit de la figure 23-14 à partir d'une plaque de montage vierge.

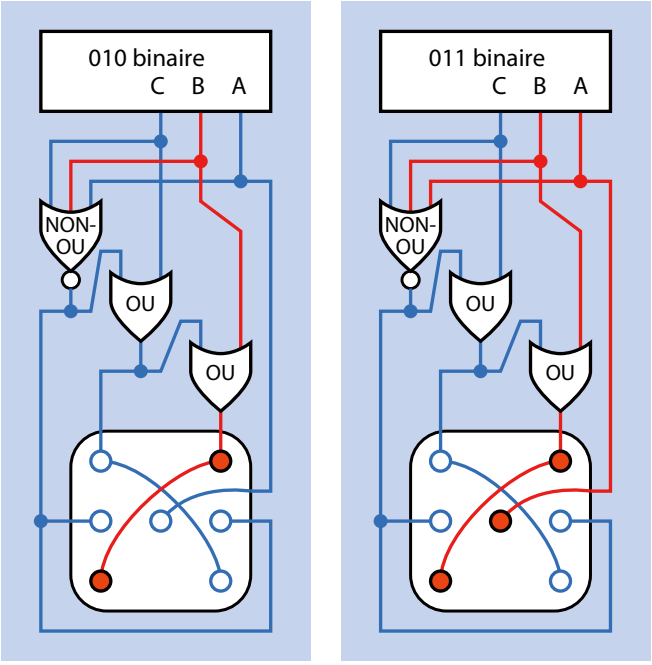


Figure 23-12. *Conversion en points des valeurs 010 et 011 du compteur.*

Ce circuit est le plus complexe de ce livre, en particulier parce qu'il est difficile d'insérer les 14 LED sur la plaque de montage. J'ai conseillé l'utilisation de LED de 3 mm de diamètre, plutôt que celles de 5 mm que j'utilise dans la plupart des projets, mais elles seront malgré tout assez serrées.

Vous devrez prendre soin de placer correctement les LED. Rappelez-vous que trois paires de LED sont reliées en série dans chacun des dés, ce qui résulte en un câblage en zigzag au travers de la plaque. Vous trouverez peut-être qu'il est plus facile de réaliser ce circuit à partir de son schéma. Peu importe la manière choisie, je vous conseille de photographier mes plans et, si vous le pouvez, de les imprimer à une plus grande échelle.

Le courant délivré par chaque broche alimentant les LED ne devra pas dépasser 5 mA, vous devrez le vérifier à l'aide de votre multimètre. La valeur optimale des résistances en série dépendra des LED que vous avez choisies. J'ai déterminé que pour chaque paire de LED reliées en série, une résistance de 470 ohms réduisait l'intensité à un peu plus que 2 mA. Vous pouvez utiliser une résistance de 330 ohms pour approcher la valeur idéale de 5 mA.

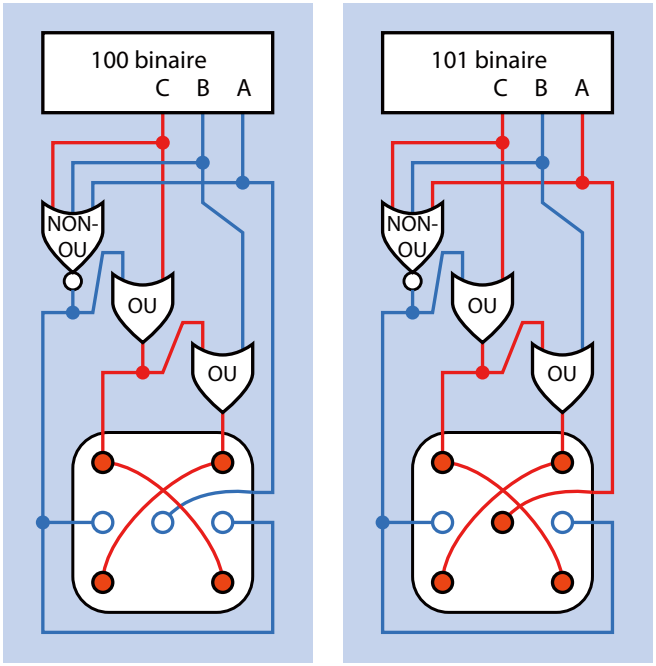


Figure 23-13. *Conversion en points des valeurs 100 et 101 du compteur.*

Pour la LED du centre qui n'est pas reliée en série avec une autre, une résistance de 1K maintient le courant à 3 mA environ. Bien que ces valeurs soient relativement faibles, j'ai constaté que les LED étaient suffisamment lumineuses.

J'ai identifié les trois sorties binaires de chaque compteur de la puce 74 HC393 par les lettres A, B et C pour vous aider à comparer le circuit avec le diagramme logique de la figure 23-10.

Tirage aléatoire

Comment cela fonctionne-t-il ?

L'aspect le plus important d'un circuit de simulation de dés est sa capacité à fournir un résultat aléatoire. La méthode habituelle pour y parvenir consiste à faire évoluer le compteur à très grande vitesse, et permettre au joueur de le stopper à un moment choisi arbitrairement. C'est exactement comme cela que ce circuit fonctionne.

Le bouton-poussoir de droite déclenche le temporisateur qui fonctionne très rapidement. Vous verrez les LED s'allumer faiblement, car elles clignotent à une cadence bien supérieure au temps de perception rétinienne.

Quand vous relâchez le bouton-poussoir, le temporisateur s'arrête et le compteur affiche une valeur des dés qui est aléatoire, en considérant que chacune des 36 combinaisons possibles est générée pour une durée identique.

Une façon d'y parvenir serait d'ajouter un second temporisateur, et de faire fonctionner séparément les deux compteurs de la puce 74 HC393. J'ai préféré ne pas le faire pour deux raisons : d'abord parce que je n'ai pas de place pour installer un second temporisateur, et ensuite parce que les deux compteurs fonctionneraient de façon asynchrone, et fourniraient certaines combinaisons plus fréquemment que d'autres.

J'ai choisi d'avoir un compteur qui déclenchait le second. Voici comment cela fonctionne :

Le premier compteur génère une séquence de six valeurs binaires de **000** à **101**, selon la méthode que j'ai expliquée précédemment. Quand il atteint la valeur **110**, pendant un très court instant les sorties B et C transmettent leurs niveaux hauts aux broches 1 et 2 de la puce 74 HC08 qui contient des portes ET. Quand les broches 1 et 2 sont au niveau haut, le 74 HC08 délivre une sortie au niveau haut sur sa broche 3. Il y a un fil de pontage vert qui relie cette broche à la broche 2 du compteur, qui est son entrée de réinitialisation. Cela permet au compteur de passer de la valeur **110** à la valeur **000**.

Cette transition fait passer la sortie C du compteur au niveau bas, et cette sortie est reliée à la broche 13. Il s'agit du fil de pontage jaune au-dessus de la puce sur la figure 23-14. La broche 13 est l'horloge du second compteur, de cette façon, le front descendant de la sortie C du premier compteur, déclenche le second compteur qui passe d'une valeur binaire, à la suivante.

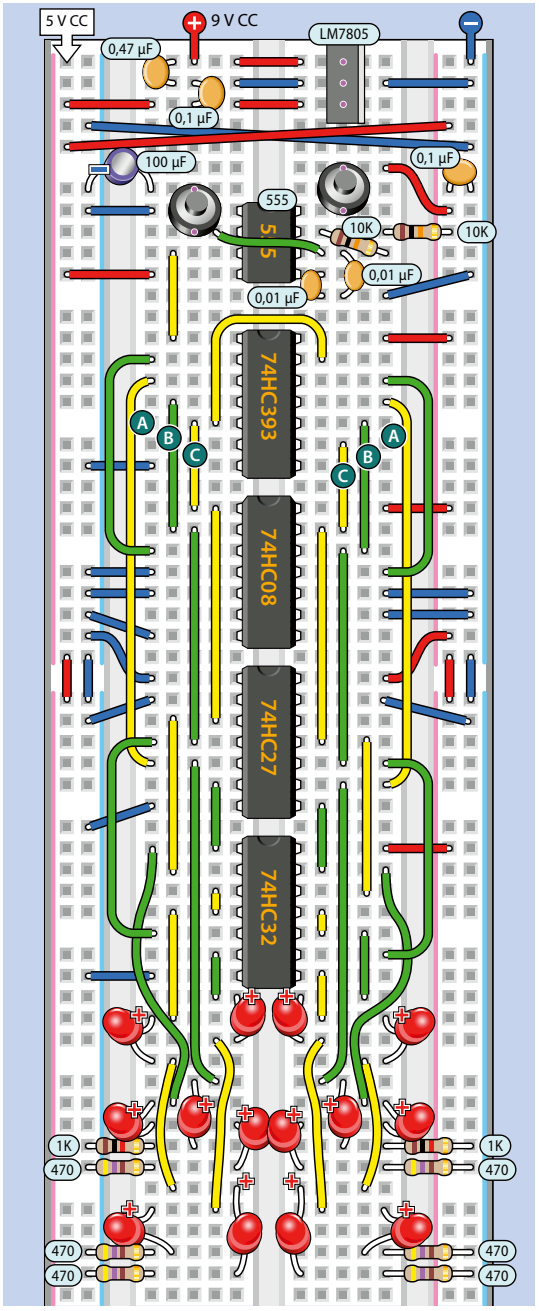


Figure 23-14. *Plan de montage du circuit des dés magiques. Les LED ont un diamètre de 3 mm, afin de tenir dans l'espace exigu en bas de la plaque. Les valeurs des résistances peuvent être légèrement modifiées pour équilibrer l'intensité lumineuse de la LED du centre avec celles des paires reliées en série.*

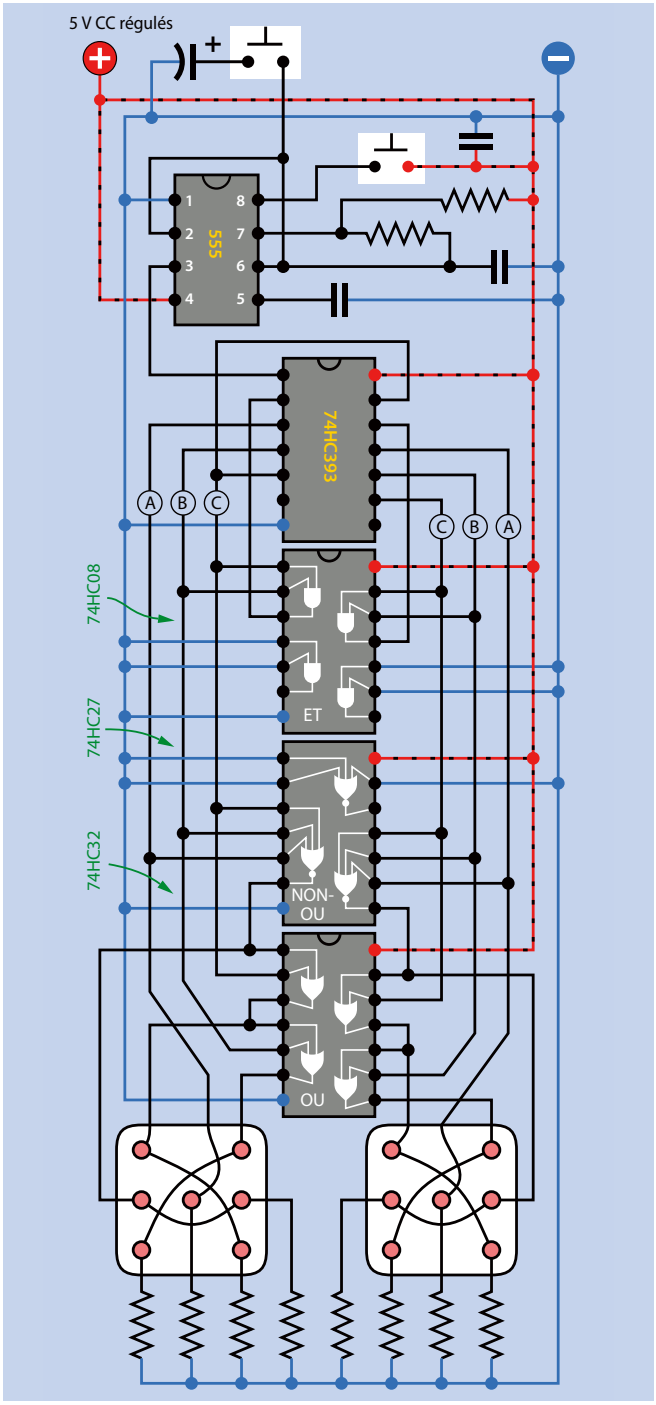


Figure 23-15. *Schéma complet du jeu des dés magiques. Les LED sont représentées par des cercles rouges pour préserver l'espace.*

Composants du circuit des dés magiques

Résistances	Condensateurs	Circuits intégrés	Autres
470 (6)	0,01 µF (2)	Temporisateur 555 (1)	Interrupteur tactile (2)
1K (2)	0,1 µF (2)	74HC393 (1)	LM7805 (1)
10K (2)	0,47 µF (1)	74HC08 (1)	LED (14)
	47 µF (1)	74HC27 (1)	
	100 µF (1)	74HC32 (1)	

Figure 23-16. *Liste complète des composants.*

En d'autres termes, quand le premier compteur termine le comptage des six valeurs du dé, il incrémente le second. Quand le second compteur atteint la valeur **110**, une autre porte ET de la puce 74 HC08 le détecte par ses broches 12 et 13. La sortie de cette porte ET part de la broche 11 du 74 HC08, vers la broche 12 du 74 HC393, réinitialisant le second compteur à la valeur **000**.

De cette façon, les deux compteurs décomptent les 36 combinaisons des dés en respectant un temps égal à chacune d'entre elles.

Si vous avez un doute sur ce principe, j'ai placé un bouton-poussoir additionnel et un condensateur à droite du circuit. Si vous maintenez ce bouton appuyé, en maintenant simultanément le bouton de droite, vous verrez le comptage évoluant toutes les secondes, la séquence apparaissant plus évidente ainsi. Le second bouton ajoute un condensateur de 100 µF au circuit définissant le timing du temporisateur 555. Quand vous n'appuyez pas sur ce bouton, le temporisateur fonctionne à la fréquence approximative de 5 kHz.

Si vous voulez être certain que toutes les valeurs ont la même incidence dans ce circuit, la meilleure façon d'y parvenir est de l'utiliser intensément, en notant le nombre de fois où chaque valeur sort. Vous devrez le faire fonctionner environ 1 000 fois pour obtenir une vérification représentative. Tout ce que je peux dire, c'est que le résultat *devrait être* aléatoire.

Améliorations

Le circuit pourrait-il être simplifié ? Comme je l'ai dit au début, un compteur décimal permettrait de définir un circuit plus simple qu'un compteur binaire. Il ne serait pas

nécessaire d'utiliser une porte ET pour obtenir un comptage en modulo six, car la septième sortie du compteur pourrait être reliée à sa broche de réinitialisation.

Néanmoins, si vous vouliez simuler deux dés, vous auriez besoin de deux compteurs décimaux et deux puces logiques pour traiter l'affichage des deux dés. Pour voir pourquoi, recherchez sur Internet : « `simulation électronique de dés` ».

Je pense que vous verrez que dès que deux dés sont simulés, mon circuit n'est pas plus compliqué que les autres qui n'utilisent pas un compteur binaire.

Inutile de dire que je suis prêt à admettre d'avoir tort, si vous parvenez à créer un circuit de simulation de dés plus soigné, je serai heureux de le voir.

Le problème du ralentissement

Dans la première édition de *L'électronique en pratique*, j'ai inclus une fonction supplémentaire au circuit du jeu des dés magiques. Quand on relâchait le bouton-poussoir de « départ », les configurations des dés ralentissaient progressivement avant de s'arrêter. Cela augmentait le suspense avant de découvrir la valeur finale des dés. Pour réaliser cette fonction, je séparais en deux l'alimentation du temporisateur 555. Le temporisateur était toujours alimenté, mais le réseau RC définissant la fréquence n'était plus alimenté dès que le joueur relâchait son bouton. À partir de cet instant, un condensateur de forte valeur se déchargeait dans le réseau RC, et le temporisateur ralentissait au fur et à mesure que la tension de son condensateur de timing diminuait.

Jasmin Patry, un de mes lecteurs, m'envoya un e-mail me donnant de mauvaises nouvelles. Il avait trouvé un moyen de faire fonctionner son circuit de façon répétitive en enregistrant automatiquement les résultats obtenus. Il s'est alors aperçu que les valeurs n'étaient pas aléatoires. La valeur 1 sortait plus fréquemment que les autres valeurs, il soupçonnait que cela provenait du circuit de ralentissement.

Jasmin était un concepteur de jeux vidéo qui comprenait mieux la randomisation que moi. C'était un homme patient et poli qui savait de quoi il parlait, et il semblait intéressé pour m'aider à résoudre le problème qu'il avait identifié.

Après m'avoir envoyé un graphique montrant la fréquence de tirage de chaque valeur de la simulation, je devais admettre que le problème existait. J'ai proposé plusieurs explications possibles, mais chacune était incorrecte. Finalement, Jasmin prouvait que la faible consommation électrique d'une seule LED, comparativement à la consommation de six LED permettait au temporisateur de fonctionner un peu plus lentement quand la tension était marginale. Cela le faisait s'arrêter plus souvent pendant l'affichage de la configuration 1 des dés que pendant la configuration 6.

Finalement, Jasmin me suggérait un circuit différent dans lequel un second temporisateur 555 était ajouté et les sorties des deux temporisateurs étaient fusionnées dans une porte OU-EXCLUSIF. Il a pu prouver que cela éliminait toute différence au niveau des valeurs 1. J'étais heureux qu'un de mes lecteurs soit capable d'améliorer un circuit que j'avais conçu, mais son circuit ne tenait plus dans une seule plaque de montage ce qui est la règle pour tous les projets de ce livre. En réalité, deux plaques de montage auraient été insuffisantes. C'est pourquoi, dans la seconde édition, j'ai éliminé le condensateur de ralentissement responsable du problème. Je n'ai toutefois pas totalement abandonné.

Autres possibilités de ralentissement

Vous pourriez penser qu'il doit y avoir un moyen simple de ralentir l'affichage sans affecter la randomisation. En cherchant en ligne, j'ai trouvé que quelqu'un avait utilisé un transistor NPN dont l'émetteur était relié à la broche 7 du temporisateur, et avec un condensateur connecté entre sa base et son collecteur, ainsi, quand l'alimentation était supprimée, la sortie du transistor diminuait progressivement. Plusieurs autres personnes avaient fait de même dans leurs circuits de simulation de dés, mais je suspecte que cette configuration présente les mêmes défauts révélés par Jasmin.

J'ai réalisé un circuit de simulation de dés totalement différent, en utilisant un microcontrôleur, dans lequel l'ajout d'une fonction de ralentissement est facile, en incrémentant une variable dans le code, mais j'ai découvert que cette solution avait son propre problème de randomisation en raison de l'imperfection du générateur de nombres aléatoires intégré à la puce.

J'ai ensuite développé un autre circuit, utilisant un autre microcontrôleur, mais à nouveau, je dépendais du générateur de nombres aléatoires interne au sujet duquel je suis sceptique quant à sa capacité à générer une suite de nombres répartis de façon égale.

Le simple besoin de randomisation n'est pas simple du tout. Le sujet m'a tellement intéressé, qu'après mes échanges avec Jasmin Patry, j'ai traité le sujet en profondeur dans mon livre *L'électronique en pratique 2*, et écrit un article dans le magazine *Make* (numéro 45), en collaboration avec Aaron Logue qui anime son propre site web, dans lequel il décrit les projets qu'il réalise. Il m'a appris à utiliser un transistor polarisé en inverse afin de générer un bruit aléatoire qui est ensuite traité par un algorithme attribué au célèbre spécialiste des sciences numériques John Von Neuman. Je pense que ce principe est le plus approchant d'un générateur de nombres aléatoires parfait que l'on pourrait espérer obtenir, mais le nombre de circuits intégrés utilisés n'était pas acceptable.

Mon collaborateur, Fredrik Jansson, m'a suggéré de résoudre le problème de mon dispositif en utilisant deux alimentations séparées, l'une exclusivement pour les LED, afin que l'intensité consommée variant selon l'affichage des dés n'affecte pas le temporisateur durant la période de ralentissement par la décharge du condensateur. Je pense que cela devrait fonctionner, mais je ne l'ai pas essayé, pensant que mes lecteurs ne souhaiteraient pas acquérir une seconde alimentation uniquement pour cette fonctionnalité.

Une autre possibilité serait d'utiliser un réseau de transistors Darlington pour amplifier la sortie des portes logiques, afin de réduire à une valeur négligeable l'intensité absorbée par les LED. Mais serait-elle négligeable ?

Pour cette édition du livre, j'ai été tenté par l'essai de quelque chose de totalement différent : utiliser un encodeur rotatif pour remplacer le temporisateur 555 utilisé comme générateur d'impulsion. Un encodeur contient un petit interrupteur qui s'ouvre et se ferme quand son axe est en rotation. Je pensais le piloter par un petit moteur qui ralentirait progressivement quand son alimentation serait interrompue (en particulier s'il était muni d'un volant). L'interrupteur générerait alors ses impulsions de plus en plus lentement avant de s'arrêter. Cependant, je ne souhaitais pas inclure un projet obligeant les lecteurs à acheter un petit moteur et un encodeur pour un seul projet, j'étais également préoccupé par la durée de vie d'un encodeur dont l'interrupteur devrait basculer au rythme de 1 kHz ou davantage. Il est possible de se procurer un encodeur rotatif optique, mais cela serait plus coûteux.

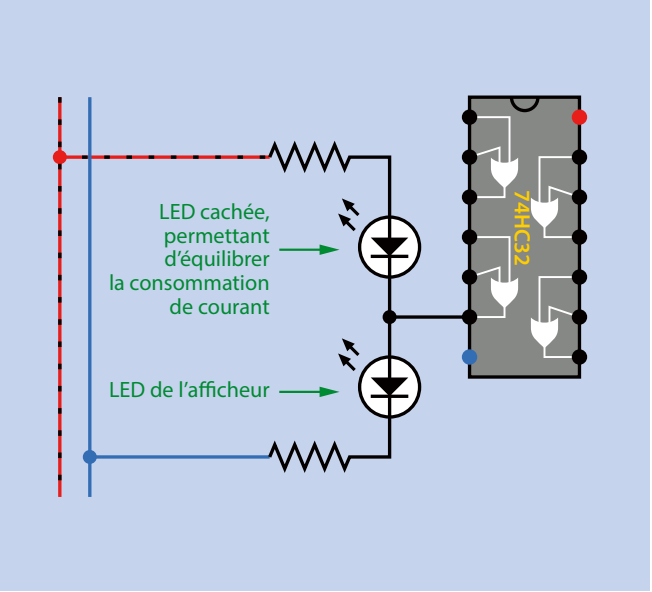


Figure 23-17. *Pour égaliser la consommation électrique à tout instant, une LED cachée additionnelle pourrait absorber du courant à chaque sortie.*

Un autre lecteur, Assad Ebrahim, m'a suggéré d'utiliser un capteur de vibrations, conjointement avec un microcontrôleur, de façon à ce que le joueur puisse agiter le montage comme un dé dans un gobelet. J'avais eu une idée identique plusieurs années auparavant, en utilisant des billes aimantées en néodyme s'entrechoquant dans un tube équipé de capteurs à effet Hall. J'ai développé cela dans un «projet bonus», offert aux personnes qui enregistraient leur adresse e-mail. Ce n'était cependant pas ce que je souhaitais, je voulais simplement un circuit autonome qui fonctionnait de façon aléatoire en ralentissant avant de s'arrêter.

Un autre lecteur, Frederik Wilson (qui m'a également aidé à vérifier le contenu de ce livre), m'a suggéré de choisir le nombre aléatoire avant de ralentir l'affichage, et de le mémoriser temporairement. Le ralentissement n'aurait alors eu qu'un rôle esthétique.

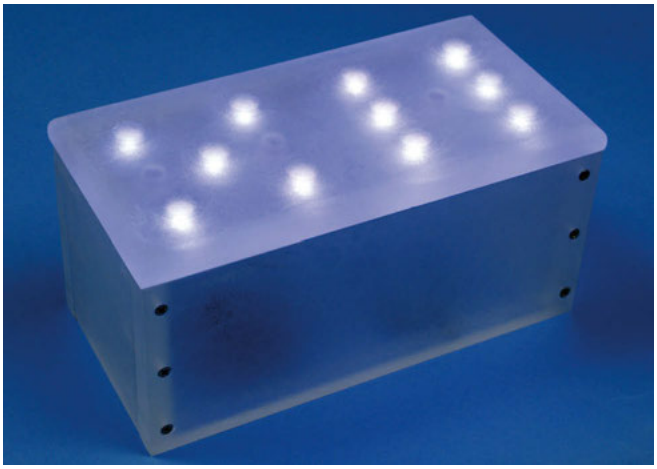


Figure 23-18. *Ce simulateur de dés électronique utilisant un microprocesseur mesure 8 cm × 15 cm.*

Après l'arrêt, le nombre serait extrait et affiché, l'observateur ne verrait pas la différence. Cette idée serait facile à mettre en œuvre avec un microcontrôleur, mais la réaliser demanderait plus de composants et de technicité que je ne souhaite ajouter au circuit.

Peu de temps avant que cette édition de *L'électronique en pratique* ne soit prête pour l'impression, j'ai reçu une idée de la part d'un autre lecteur, Jolie de Miranda, qui introduisait une approche nouvelle : une LED additionnelle pourrait être ajoutée à chaque LED centrale de l'afficheur. La LED ajoutée serait dissimulée par un morceau de ruban adhésif opaque, sa fonction se limiterait à équilibrer la consommation de courant avec celle des autres configurations affichées.

Cela ne résoudrait malheureusement pas le problème de la consommation importante lorsque plusieurs LED sont allumées. Mais quand j'ai parlé de ce concept à Fredrik Jansson ; il m'a suggéré d'équilibrer les consommations électriques, en ajoutant une LED cachée à chacune des LED (en la munissant d'une résistance en série).

Le schéma simplifié de cette modification est représenté sur la figure 23-17. Chaque LED ajoutée est reliée entre le pôle positif de l'alimentation et la sortie de la porte logique. De cette façon, la LED dissimulée absorbera du courant quand la sortie sera au niveau bas, tandis que la LED de l'affichage absorbera du courant quand la sortie sera au niveau haut.

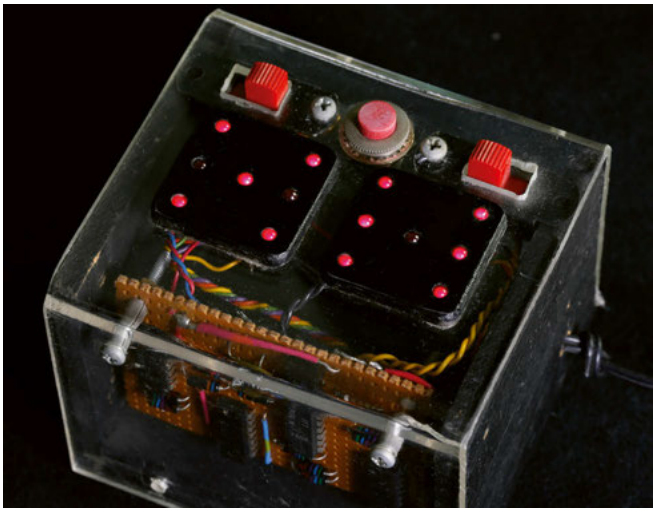


Figure 23-19. *Projet des dés magiques, conçu et réalisé au milieu des années 1970 dans un coffret en plexiglas et bois peint.*

Une puce CMOS possède des sorties conçues symétriquement : elles absorbent du courant quand elles sont au niveau bas, et en fournissent quand elles sont au niveau haut, tant qu'elles ne sont pas surchargées. Avec la proposition de Frederik, chaque sortie logique fournirait ou absorberait une intensité identique à tout moment, ainsi la consommation de chaque puce serait pratiquement constante. C'est évidemment une solution peu efficace au problème, mais le prix de la randomisation vaut bien celui de quelques milliampères additionnels.

Entre-temps, j'ai ajouté quelques photos du projet des dés magiques. Celui de la figure 23-18 a été réalisé dans un coffret en polycarbonate de 1,3 mm d'épaisseur, dépoli par sablage, avec des LED de 10 mm insérées dans des cavités sous le couvercle. Celui de la figure 23-19 est une version plus ancienne que j'avais réalisée avec des puces 74LSxx après avoir parcouru *TTL cookbook*, le livre passionnant de Don Lancaster. Presque 50 ans plus tard, les LED s'allument toujours de façon aléatoire (du moins, je pense que c'est aléatoire).

Chapitre 5

Et après ?

À ce stade du livre, plusieurs axes de développement sont possibles. En voici quelques-uns.

Électronique audio : Il s'agit d'un domaine bien spécifique, allant du simple amplificateur au dispositif permettant de modifier le son d'une guitare.

Électromagnétisme : C'est un sujet dont je n'ai pas encore parlé, mais qui permet des applications fascinantes.

Appareils à fréquences radio : Cela concerne tout appareil qui reçoit ou transmet des ondes radio, du récepteur à modulation d'amplitude jusqu'aux transmissions complexes.

Microcontrôleurs programmables : Il s'agit de minuscules ordinateurs implantés sur un seul circuit intégré. Vous devez écrire un petit programme sur votre ordinateur puis le charger dans le circuit intégré. Le programme indique au microcontrôleur la séquence d'actions qu'il doit suivre, comme : recevoir un signal d'entrée en provenance d'un capteur, attendre un temps défini, puis démarrer un moteur.

Je n'ai pas la place ici pour présenter de manière détaillée ces différentes branches de l'électronique. Aussi vais-je me contenter, à titre d'introduction, de décrire quelques projets dans chaque domaine. Ce petit aperçu devrait vous aider à mieux cerner vos domaines de prédilection ; il ne vous restera plus qu'à lire des ouvrages spécialisés pour en apprendre davantage.

Dans ce chapitre, je vous donnerai aussi quelques conseils à propos de votre espace de travail, ainsi qu'une petite bibliographie, pour aller plus loin en amateurisme électronique.

Outils, composants et fournitures

Ni outils, ni équipements supplémentaires ne sont nécessaires pour ce dernier chapitre du livre. Vous aurez besoin de quelques éléments additionnels pour certains de projets, comme par exemple du fil électrique pour étudier l'électromagnétisme, j'en dresserai la liste au début de chaque expérience. La liste complète des composants figure dans l'annexe A.

Le rangement

Si vous sentez la passion de créer des circuits vous gagner, mais que vous n'avez pas encore aménagé votre espace de travail, voici quelques suggestions. Votre hobby sera plus agréable si vous prévoyez un aménagement fonctionnel.

De nombreux composants électroniques sont minuscules, ils nécessitent de prévoir leur stockage, leur marquage, et un moyen de les retrouver facilement, quand vous en avez besoin. Les outils comme le fer à souder, le pistolet à air chaud ou le multimètre sont de plus grandes tailles. Il vous faudra également un ordinateur pour pouvoir accéder rapidement aux fiches techniques et vous utiliserez peut-être un oscilloscope.

Vous aurez un besoin fréquent de certains composants, comme les résistances et les condensateurs. D'autres ne seront utilisés que plus rarement, il en est de même pour certains outils qui seront plus fréquemment utilisés que d'autres. Un rangement bien pensé devra prendre ces critères en considération.

Pour les composants, un classement par catégories s'impose. Par exemple les circuits intégrés, les relais, les reproducteurs sonores (buzzers et haut-parleurs), les plaques de montages et plaques perforées, les supports de piles, les inductances, les coffrets, les moteurs, les potentiomètres ajustables, les petits et gros interrupteurs et tous types de fils. Pour l'instant, vous n'aurez pas une grande quantité

de chacun d'eux, mais comme dans tout hobby, vous aurez tendance à accumuler les fournitures, c'est pourquoi il est prudent de prévoir le futur.

Cela m'amène à trois conclusions :

- Vous devez disposer de moyens de rangement facilement accessibles, près de votre table de travail.
- Un stockage sous votre table est également possible.
- Du rangement de chaque côté et derrière vous ne serait pas non plus une mauvaise idée.

La plupart des tables de travail ne comportent pas beaucoup de moyens de stockage en dessous de leur plateau, c'est pourquoi, je commencerai par cela. Il y a un moyen de rangement que j'apprécie, utilisé depuis des décennies dans les bureaux : le classeur à tiroir.

Leurs tiroirs sont assez volumineux et ils protègent de la poussière. Je ne vous suggère pas de les utiliser pour classer de multiples documents papier (bien que personnellement, je conserve de nombreuses fiches techniques imprimées). L'idée est de les aménager en espace de stockage modulable contenant des boîtes en plastiques. Ces boîtes contiendront les matériels de taille moyenne peu souvent recherchés, comme les coffrets, ou le fil de gros diamètre. Ces boîtes peu souvent utilisées seront au fond d'un tiroir, surmontées par les autres contenant des composants plus fréquemment utilisés.

Figure 24-1. *Petite boîte de rangement empilable (Akro-Grid).*

Pour cet usage, une boîte de rangement typique mesure environ 30 cm par 20 cm (rappelez-vous qu'un tiroir mesure environ 32 cm de large par 60 cm de profondeur), trois boîtes de ce type pourront y loger sans perte de place. La profondeur de chaque tiroir est en général de 25 cm et en principe, si vos boîtes font 12 cm de haut, vous pourrez en superposer deux. Celles que j'aime ressemblent à celle de la figure 24-1, de type Akro-Grid, de la marque Akro-Mils. Elles sont solides, peuvent être cloisonnées, et sont facilement empilables, je les dispose en long dans mes tiroirs. Vous en trouverez dans les magasins de bricolage, ou en ligne. Vous pourrez également acheter des boîtes transparentes avec un couvercle dans les boutiques de fournitures pour la pêche où elles sont vendues pour le rangement des articles de pêche.

Figure 24-2. *Boîte avec couvercle pour le rangement de petites pièces.*

Si l'idée d'enfouir vos fournitures au fond d'un tiroir ne vous plait pas, les éléments que vous utilisez le plus fréquemment pourront être rangés sur des étagères, à condition de les protéger de la poussière ce qui exclut l'utilisation de boîtes de rangement sans couvercle. Quel autre type de boîte utiliser ?

Vous pourriez être tenté d'acheter des blocs de tiroirs d'environ 30 cm de haut, munis de 20 à 30 petits tiroirs en plastique mesurant chacun environ 5 cm de large et 15 cm de profondeur. Ces blocs peuvent être suspendus au mur et vous permettront de ranger vos résistances, condensateurs, et semi-conducteurs, et de les retrouver facilement.

Selon mon expérience, les tiroirs sont trop grands pour les transistors ou les LED, mais trop petits pour certains composants comme les boutons rotatifs de réglages. De plus ils ne protègent pas efficacement de la poussière.

Les petites boîtes de rangement avec des cloisons internes paraissent pratiques, mais les séparations ne sont pas très solides et les composants risquent de se mélanger ce qui nécessitera de les classer à nouveau. Après de nombreux essais, j'ai choisi les petites boîtes de rangement à cloisons fixes Darice Mini-storage boxes, comme celles de la figure 24-3. Vous pouvez les trouver dans les magasins de loisirs créatifs, ou les acheter, par lots plus économiques, en ligne. Faites une recherche avec « Darice Mini-storage boxes » ou, pour une recherche plus générale : « boîtes de rangement à compartiments ».

Elles existent en différentes variétés, selon la taille des composants à ranger.

Figure 24-3. *Boîtes compartimentées convenant au rangement des résistances, condensateurs et semi-conducteurs (Darice Mini-storage).*

Certaines boîtes comportant 5 compartiments permettent de ranger des résistances avec leurs fils d'origine, d'autres divisées en plus petits compartiments, sont idéales pour le rangement des composants semi-conducteurs et des LED. Certaines n'ont pas de cloisonnement, et permettent le stockage d'éléments de dimensions plus importantes. Leurs couvercles verrouillables évitent que les composants ne puissent tomber, elles sont en général empilables. La figure 24-3 montre quelques boîtes cloisonnées.

Si vous avez choisi ce type de boîtes de rangement, où allez-vous les mettre ?

Vous pouvez les disposer sur des étagères, mais je préfère quelque chose de plus modulaire : les petites boîtes peuvent être rangées dans des boîtes plus grandes les protégeant de la poussière. J'ai trouvé des boîtes en plastique transparent avec couvercle, peu coûteuses permettant de contenir une dizaine de boîtes compartimentées.

Si vous utilisez une grande boîte pour chaque catégorie de composants, comme par exemple « sources lumineuses », chaque petite boîte aura une sous-catégorie, comme « LED de puissance », leur contenu sera facile à retrouver.

Figure 24-4. *Boîte de rangement pouvant contenir 9 boîtes compartimentées.*

Pour ma part, je me suis organisé pour que chaque boîte contienne 9 coffrets de 10 compartiments, ce qui me permet de disposer de 90 types de LED et lampes différentes et de les retrouver facilement.

Est-ce que 90 vous semble excessif ? Peut-être. Cependant, on ne sait jamais, je ne manquerai pas de possibilité de stockage.

Pour ranger les grandes boîtes transparentes, j'ai trouvé des étagères métalliques réglables en hauteur, ainsi, je dispose d'une grande variété de composants à portée de main depuis ma table de travail, comme sur la figure 24-5.

Tout cela vous paraît peut-être excessif, voire compulsif. En réalité, j'ai tendance à être désorganisé et j'ai perdu beaucoup de temps, dans le passé, à rechercher des composants que je n'avais pas pris le soin de ranger proprement. C'est comme une personne en surpoids qui est toujours à la recherche d'un régime. Un peu de discipline personnelle s'impose.

Figure 24-5. *Avec un peu de persévérance, vous devriez pouvoir trouver des étagères permettant de ranger les boîtes en plastique, en perdant le minimum de place.*

Toute organisation doit bien entendu être modifiée, si elle n'est pas satisfaisante dans son usage de tous les jours. L'expérience m'a enseigné que la combinaison des petits coffrets de rangement stockés dans des boîtes plus grandes n'était pas satisfaisante en ce qui concerne les composants fréquemment utilisés comme les résistances ou les condensateurs.

Pour les résistances, j'ai décidé de raccourcir leurs fils et de les plier afin de les entreposer dans des petits flacons avec un couvercle à vis. Vous n'avez pas besoin de résistances avec des fils longs pour les expériences de ce livre. Des fils de 1 cm suffiront.

Figure 24-6. *Les résistances raccourcies trouveront place dans des petites boîtes d'environ 4 cm de diamètre, les condensateurs en céramique dans des boîtes plus petites.*

Les condensateurs en céramique peuvent trouver place dans des boîtes similaires mais de plus petit diamètre. Les deux types sont représentés sur la figure 24-6.

Ensuite, j'ai réalisé deux présentoirs, l'un pour les condensateurs (voir figure 24-7), un autre pour les résistances (voir figure 24-8). Les logements cylindriques ont été réalisés à l'aide de forets Forstner de diamètre adéquat pour que les boîtes puissent s'insérer sans pouvoir tomber. Ces deux présentoirs sont face à moi sur ma table de travail, ils ne prennent pas trop de place. C'est pour moi la meilleure solution pour le rangement de ces composants.

Vous avez peut-être vos propres idées pour le rangement et elles sont peut-être différentes des miennes. C'est normal, chacun doit avoir sa propre organisation, reflet de ses préférences personnelles.

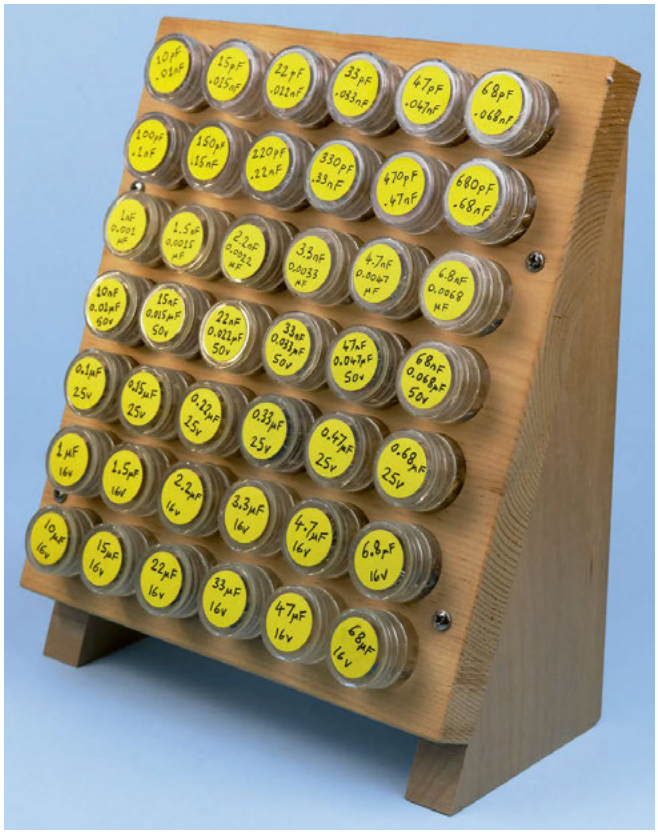


Figure 24-7. *Présentoir pour le stockage des condensateurs.*

Figure 24-8. *Présentoir pour le stockage des résistances.*

Je dois encore vous avertir d'un autre risque, la dispersion des composants.

Dans un commerce local, j'ai pu trouver des boîtes ayant 15 ou 20 compartiments pour le stockage des perles. Ces boîtes semblent être idéales, mais elles ne sont refermées que par un couvercle unique. Si une telle boîte tombe sur le sol quand son couvercle est ouvert, les conséquences sont cauchemardesques. Les composants vont s'éparpiller, se mélanger, et s'il s'agit de condensateurs en céramique, je vais devoir passer beaucoup de temps à les identifier et lire leurs valeurs, en utilisant une loupe, pour les reclasser ensuite.

Pour les gens maladroits comme moi, les petites boîtes avec un couvercle vissé ont l'avantage de ne pas s'ouvrir seules, même en tombant sur le sol, il faut toutefois bien s'assurer que le couvercle soit vissé fermement.

Votre espace de travail

Quand j'ai commencé à lire des livres de vulgarisation en électronique, j'ai été surpris que certains auteurs fournissent des plans pour la réalisation de leur espace de travail. Je ne pensais pas que quiconque ait dû réaliser quelque chose de spécial, rien que pour relier quelques composants sur une plaque de montage, ou même en les soudant.

La configuration minimum que je recommande se compose d'une paire de meubles de rangement à deux tiroirs surmontés d'un plateau en formica ou en contre-plaqué. J'aime les plans de travail des cuisines, parce qu'ils sont en général munis d'un rebord empêchant les petites pièces de tomber derrière.

Parmi tous les plans de travail que j'ai utilisés, celui que j'ai préféré était un ancien bureau métallique – un monstre

des années 1950. Les meubles de ce type sont difficiles à déplacer à cause de leur poids, et ils ne sont pas très esthétiques, vous pouvez en trouver pour un coût négligeable chez les revendeurs de fournitures de bureau d'occasion. Ils offrent une surface importante, supportent les contraintes du bricolage et dureront longtemps. Leurs tiroirs sont profonds et s'ouvrent en général facilement, comme ceux des meubles de rangement. Et comme ils sont métalliques, vous pouvez vous en servir pour vous relier à la terre, avant de manipuler des composants sensibles à l'électricité statique.

Figure 24-9. *Alimentation de laboratoire.*

Quels outils et fournitures devez-vous placer sur votre table de travail ? Heureusement, vous n'avez pas besoin d'un grand espace pour réaliser des projets électroniques, il vous est possible de garder près de vous ce que vous utilisez souvent.

Une *alimentation de laboratoire* vous permettra de disposer d'une source d'alimentation filtrée, régulée et stable quel que soit le courant absorbé, ce que ne peut pas vous offrir un bloc d'alimentation secteur. Néanmoins, vous l'avez constaté, un bloc d'alimentation secteur peu onéreux, délivrant une tension continue de 9 V, est suffisant pour les expériences de base.

Figure 24-10. *Le Picoscope 2204A se branche sur le port USB d'un ordinateur.*

Par contre, quand vous utilisez des circuits intégrés logiques, vous devez prévoir un régulateur de 5 V sur votre plaque de montage. En considérant ces éléments, je pense qu'une bonne alimentation de laboratoire est souhaitable mais optionnelle. La photo d'une alimentation relativement peu coûteuse se trouve sur la figure 24-9.

Un *oscilloscope* est un autre appareil optionnel. Il vous montrera en temps réel les variations des signaux dans votre montage, et vous permettra de résoudre des mystères qui, autrement, seraient déconcertants. Par exemple, j'ai pu en apprendre plus sur le déplacement de courant à l'aide d'un oscilloscope qu'en lisant des documents.

Les oscilloscopes sont maintenant plus abordables qu'ils ne l'étaient lorsque j'ai commencé, il y a pas mal d'années, à m'intéresser à l'électronique. Le Picoscope dont j'ai fait l'acquisition coûte le dixième du prix de l'oscilloscope à tube cathodique que j'avais acquis en 1999. Il est plus performant, sa résolution est meilleure, et il tient dans un coffret d'environ 8 cm × 13 cm que vous pouvez voir sur la figure 24-10. Il se connecte au port USB de n'importe quel ordinateur qui se charge de visualiser les signaux sur son écran. Un ordinateur d'occasion peu coûteux et le Picoscope vous offriront les mêmes performances qu'un appareil qui coûtait plusieurs milliers d'Euros, de plus il vous permettra d'enregistrer les oscillogrammes sur votre disque dur.

Les pinces plates, les pinces coupantes, les pinces à dénuder et une loupe seront certainement les bienvenues sur votre

table de travail, tout comme un ordinateur portable qui vous permettra de documenter vos aventures en électronique. La figure 24-11 montre une solution de rangement que j'ai réalisée le jour ou j'ai décidé que mes pinces ne devaient plus être difficilement accessibles.

Sur ma table, j'ai également un socle en contreplaqué d'environ 60 cm de côté qui me permet d'y fixer un petit étau sur un des côtés. C'est stable et me permet de l'orienter pour observer un montage sous un angle différent. J'utilise également une troisième main moderne.

Au-préalable, j'avais recouvert le contreplaqué de mousse conductrice pour réduire les risques de décharge électrostatique quand j'utilisais des composants fragiles.

Figure 24-11. *Socle de 18 cm par 10, permettant un accès rapide aux différentes pinces.*

Au fil du temps, j'ai réalisé que le revêtement de sol, la chaise, mes chaussures et ma transpiration, évitaient que je sois sujet à l'accumulation d'électricité statique, bien que je réside dans une région où le taux d'humidité ambiante est particulièrement faible. L'électricité statique est un risque que vous devez évaluer par expérience. Si vous avez déjà ressenti une petite décharge quand vous vous déplacez et entrez en contact avec une surface métallique, vous devez vous relier à la terre ou utiliser de la mousse antistatique (ou une surface métallique) quand vous réalisez des montages comportant des puces CMOS.

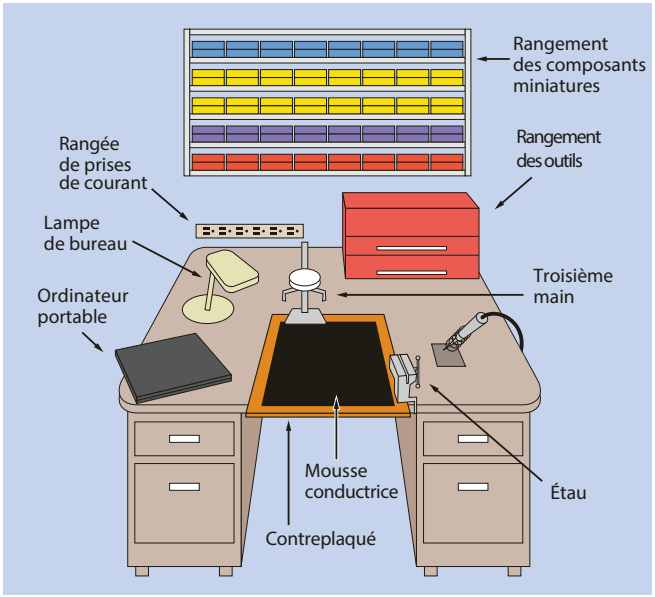


Figure 24-12. *Un ancien bureau métallique est peut-être aussi adapté, voire mieux, qu'un établi conventionnel pour la réalisation de petits projets électroniques.*

Durant vos activités, vous créerez inévitablement des déchets. Petits morceaux de fil repliés, vis et fixations abandonnées, qui pourront provoquer des courts-circuits s'ils se mettent dans vos montages, c'est pour cela qu'il vous faut disposer d'une poubelle assez grande pour vous rappeler de l'utiliser.

Une configuration possible de votre espace de travail, équipé d'un bureau métallique, est représentée sur la figure 24-12. La figure 24-13 suggère une version plus optimisée de l'espace.

Sources de référence en électronique

Alors que vous progressez en électronique, quels sont les sites web qui vous pourraient vous aider à perfectionner et compléter vos connaissances ? C'est une question difficile car beaucoup de ressources en ligne ont une couverture incomplète des sujets, certaines ne sont pas totalement

fiables. De plus, beaucoup sont en langue anglaise. Parmi les ressources en anglais, j'apprécie le magazine *Nuts and Volts*, qui contient de nombreux tutoriaux dans ses archives :

www.nutsvolts.com

Je considère que *Instructables* explique bien les concepts de base :

https://www.instructables.com/Basic-Electronics/

Figure 24-13. *Pour profiter au maximum de l'espace environnant, vous pouvez vous entourer de cloisons.*

Mon éditeur, *Make Community,* publie des projets intéressants, certains utilisant des composants électroniques :

https://make.co/

J'apprécie les produits vendus en ligne par Adafruit :

www.adafruit.com/

Si vous aimez les sites web classiques, ou les blogs, animés par des enthousiastes solitaires, l'un des derniers à survivre est celui de Don Lancaster *Gurus's Lair* :

www.tinaja.com

L'ouvrage *TTL Cookbook* de Don Lancaster a permis de découvrir l'électronique à au moins deux générations d'amateurs. Il sait de quoi il parle, et il n'a pas peur d'aborder des sujets ambitieux, comme par exemple l'écriture de son propre pilote PostScript et créer des connexions par port série. Vous pourrez trouver de nombreuses idées sur son site, tant qu'il existe.

Voici maintenant une liste de sites divers qui peuvent vous donner des idées de projets intéressants, et la façon de les réaliser.

- Sciences mathématiques et technologie fournit des liens vers toutes sortes de produits :

  http://mathscitech.org/articles/electronics#inspiration

- *Hackaday recèle un ensemble d'informations et d'idées :*

  https://hackaday.com/

- *Ici, vous trouverez 30 projets Arduino entièrement documentés :*

  https://howtomechatronics.com/arduino-projects/

- The Turtlebot Home page :

  https://www.turtlebot.com/

- Ici, des douzaines de projets Arduino intéressants :

  https://trybotics.com/project

- DF Robot :

  www.dfrobot.com/blog

- Projets dans les garages des étudiants de l'université Carnegie-Mellon :

  https://www.build18.org/garage/

- Technique de soudure des composants montés en surface (CMS) :

  https://schmartboard.com/

- Ici, vous trouverez un projet d'ordinateur à 8 bits réalisable avec des plaques de montages (il vous en faudra plus qu'une) :

  https://eater.net/8bit/

- Quelques gadgets peu coûteux :

  www.icstation.com/index.php

- Des projets électroniques musicaux à faire soi-même :

  https://diyelectromusic.wordpress.com/

Je ne peux évidemment pas vous garantir combien de ces sites seront toujours opérationnels quand vous lirez ces lignes.

Tous ces sites sont en langue anglaise, voici toutefois quelques sites en français qui pourront vous apporter aide et idées, pour réaliser vos projets, ou perfectionner vos connaissances.

- Elektronique cours et montages propose une multitude de cours, montages et logiciels pour les amateurs d'électronique :

  http://www.elektronique.fr/cours.php

- *L'électronique.com – le portail dédié à l'électronique propose également cours, montages, documents et logiciels, mais aussi des informations relatives au domaine de l'électronique :*

  https://www.lelectronique.com/

- *Passion électronique – pour apprendre l'électronique chez soi :*

  https://passionelectronique.fr/

- Le site de Christian Tavernier, auteur de plusieurs ouvrages de référence, offre toute une gamme de services liés à l'électronique et à la microinformatique – documentations, brochages, normes, schémas, réalisations de montages divers, présentation de circuits intégrés, logiciels pour l'électronique, livres, etc. :

  http://www.tavernier-c.com

- Le site de la revue *Elektor* regroupe notamment des articles, un forum, ainsi que des composants et des kits à la vente :

  http://www.elektor.fr

- Le portail ABCelectronique est un site prisé par les professionnels et les amateurs, qu'ils soient débutants ou confirmés, dans le domaine de l'électronique et des circuits intégrés :

  http://abcelectronique.com

Il en existe de nombreux autres, notamment parmi les sites animés par des étudiants d'universités ou des écoles techniques, tout comme certaines pages personnelles d'internautes. Vous les trouverez facilement en recherchant le thème que vous souhaitez aborder ou approfondir.

Bibliographie

Si vous souhaitez acquérir d'autres livres, j'espère que vous penserez à acheter un de mes ouvrages ! *L'Électronique en pratique 2* est un livre d'initiation qui prends la suite de celui-ci, *Encyclopedia of Electronic Components* est un ouvrage de référence sur les composants. Cette encyclopédie est en trois volumes, une partie des textes a été écrite en collaboration avec Frederik Jannson.

Practical Electronics for Inventors de Paul Scherz est un livre que je recommande toujours, si vous recherchez un bon volume de référence. En dépit de son titre, vous le trouverez utile, même si vous n'inventez rien.

CMOS Sourcebook de Newton C. Braga est entièrement consacré à la série de circuits intégrés CMOS 4000 mais pas à la série 74 HCxx que j'ai utilisée dans ce livre. La série 4000 est plus ancienne et davantage vulnérable à l'électricité statique, mais ce composant demeure largement disponible et tolère une large plage de tensions d'alimentation variant de 5 V à 15 V. Cela signifie que vous pouvez concevoir un circuit alimenté sous 9 V utilisant un temporisateur 555, et utiliser sa sortie à l'entrée d'une puce CMOS, ou vice-versa.

The Encyclopedia of Electronic Circuits de Rudolf F. Graf est une collection de multiples schémas, classés par fonction et comportant des explications sommaires. C'est un livre utile à conserver près de vous si vous avez une idée, et souhaitez savoir comment d'autres personnes l'ont mise en œuvre. De nombreux autres volumes de cette série ont été publiés, mais vous pouvez commencer par celui-ci qui contient tout ce dont vous pouvez avoir besoin.

The Circuit Designer's Companion de Tim Williams contient les informations les plus pertinentes pour réaliser des applications fonctionnelles pratiques, toutefois le style

est direct et assez technique. Il pourrait vous être utile si vous avez appris l'ensemble des bases et êtes intéressé à adapter vos projets au monde réel.

L'ensemble des livres publiés par Forrest Mims sont d'un niveau abordable, ils contiennent des idées de projets électroniques. Son petit guide *Getting Started in Electronics* est un ouvrage récréatif d'apprentissage, j'ai couvert certains de ses sujets dans ce livre, mais vous pourriez apprécier de lire les explications et conseils provenant de quelqu'un de différent. De plus, il décrit plus profondément que moi certains sujets théoriques électriques, d'une façon facile à comprendre, enrichie de jolies illustrations.

Quelques publications en français vous seront également utiles, parmi elles je citerai :

- *Arduino – Maîtriser sa programmation et ses cartes d'interface (shields)*, de Christian Tavernier (Dunod, 2011). Si vous appréciez la simplicité et les performances du microcontrôleur Arduino que je décris plus loin, cet ouvrage est une excellente introduction et il vous familiarisera avec le langage de programmation associé.

- *Le grand livre d'Arduino*, d'Erik Bartmann (Eyrolles, 2015), dont la dernière édition est parue en mai 2022, est remarquable par son approche pédagogique. Cet ouvrage va plus loin que le précédent, en délivrant un peu de théorie et surtout beaucoup de pratique avec ses 27 montages à réaliser.

- *Fondements d'électronique, 6e éd.* et *Systèmes numériques, 9e éd.*, de Thomas L. Floyd (Reynald Goulet, 2013). Ces deux bibles de l'électronique, régulièrement rééditées, constituent des ouvrages de référence pour les étudiants comme pour les amateurs, en dépit de leur aspect académique.

Expérience 24
Autour du magnétisme

Après avoir passé en revue vos choix futurs, étudions un sujet important que nous n'avons pas encore abordé : la relation entre l'électricité et le magnétisme. Cela va nous amener rapidement à la reproduction audio, puis à la radiodiffusion. Je vais détailler les principes fondamentaux de l'inductance, qui est la troisième et dernière propriété des composants passifs, après la résistance et la capacitance. Il s'agit d'une notion rarement appliquée dans les circuits fonctionnant en tension continue. Mais dès que nous commencerons à étudier les signaux analogiques fluctuants, cela deviendra fondamental.

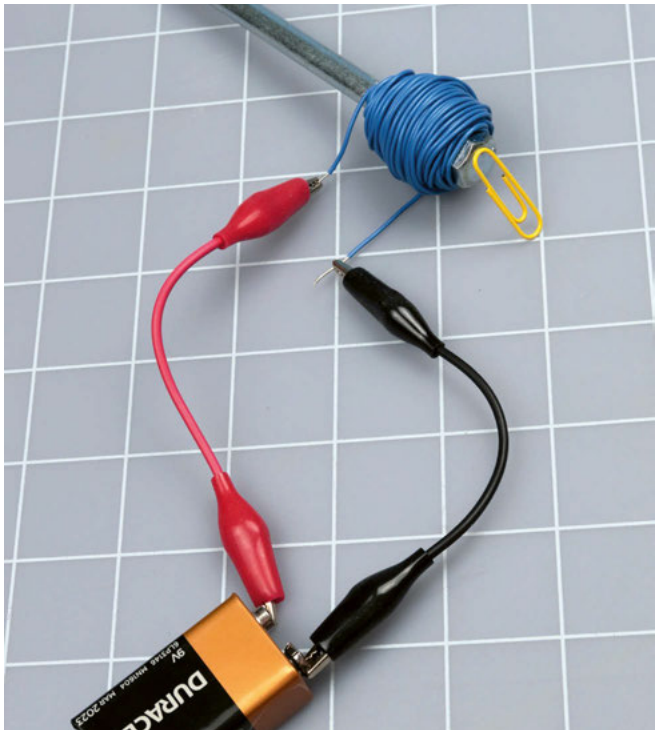


Figure 24-14. *Cet électroaimant rudimentaire, réalisé sur une vis, est assez puissant pour attirer un trombone, quand il est alimenté par une pile.*

Vous aurez besoin de :

- 1 grand tournevis
- environ 8 m de fil de jauge AWG 22 (0,64 mm) ou plus fin
- 1 pile de 9 V
- 1 trombone

Marche à suivre

Il n'y a pas plus simple. Enroulez environ 8 mètres de fil de jauge 22 (0,63 mm), autour de l'axe d'un tournevis ou de tout autre objet en acier, par exemple une grande vis. N'utilisez pas un objet en acier inoxydable qui serait amagnétique.

Les spires doivent être bien formées, serrées et également espacées, vous devriez en bobiner une centaine sur une longueur d'environ 5 cm. Pour loger ces spires dans cette longueur, vous devrez les empiler sur plusieurs couches. Si le dernier tour a tendance à se dérouler, maintenez-le en place à l'aide d'un morceau de ruban adhésif.

Reliez maintenant la bobine ainsi constituée à une pile de 9 V. Le bobinage devrait consommer entre 1 et 2 A, ne le laissez pas connecté plus que quelques secondes.

Un bobinage ayant ce nombre de spires devrait générer un champ magnétique suffisamment intense pour soulever un trombone posé sur votre table.

Félicitations, vous venez de fabriquer un électroaimant. Le schéma de ce circuit est représenté sur la figure 24-15.

Fondamentaux : une relation bilatérale

L'électricité peut créer un champ magnétique : quand l'électricité traverse un conducteur, elle crée un champ magnétique autour de ce conducteur. Ce principe est utilisé par la plupart des moteurs électriques.

À l'inverse, le magnétisme peut aussi créer de l'électricité : quand un conducteur se déplace dans un champ magnétique, ce dernier crée un courant électrique dans le fil, à condition qu'il fasse partie d'un circuit fermé.

Ce principe est utilisé dans les générateurs d'électricité. Un moteur diesel, une turbine, une éolienne, ou toute autre source d'énergie fait tourner un bobinage de fil conducteur dans un champ magnétique puissant. De l'électricité est induite dans la bobine. À l'exception des panneaux solaires, toutes les sources produisant de l'énergie électrique utilisent des aimants et des enroulements filaires.

Dans l'expérience suivante, vous allez réaliser un générateur d'électricité portable, capable d'allumer une LED. Je dois tout d'abord vous enseigner un peu de théorie.

Théorie : l'inductance

L'électricité *induit* un champ électrique dans un conducteur, cet effet s'appelle *l'inductance*, elle quantifie la capacité du conducteur à créer un champ magnétique.

Un simple morceau de fil rectiligne génère un champ magnétique de faible intensité à son pourtour immédiat, comme le montre la figure 24-16 sur laquelle vous devez considérer qu'un courant électrique circule de gauche à droite, selon le sens conventionnel.

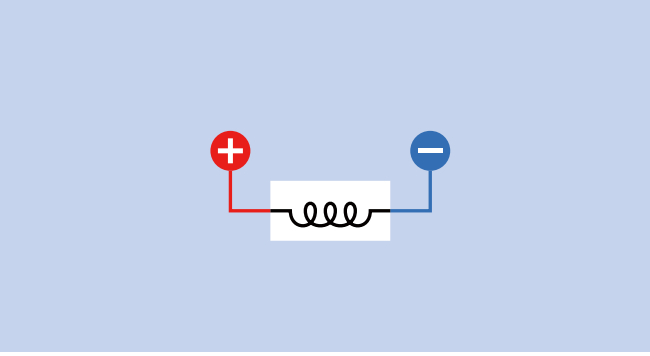


Figure 24-15. *Aucun schéma ne peut être plus simple que celui-ci.*

Si vous pliez le fil en forme de cercle, la force magnétique se concentre vers le centre du cercle comme sur la figure 24-17. Si vous ajoutez des cercles de fil, vous formez une bobine, dans laquelle le champ magnétique se renforce davantage. Si vous placez un objet en fer ou en acier au centre de la bobine, il concentre le champ magnétique dont l'efficacité devient plus grande.

Sur la figure 24-18, vous verrez une représentation graphique de ce comportement ainsi que la formule dite « formule de Wheelers » qui n'est pas très précise, car cela dépend du type de fil utilisé. Elle permet cependant

d'obtenir une estimation de l'inductance d'une bobine de fil enroulé selon son diamètre intérieur, son diamètre extérieur, la largeur de l'enroulement et le nombre de spires. (Les dimensions doivent être exprimées en pouces.)

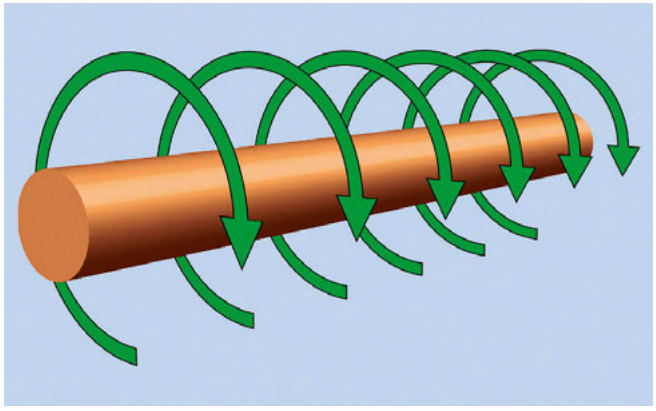


Figure 24-16. *Quand le courant circule de gauche à droite dans le conducteur, il induit un champ magnétique représenté par les flèches vertes.*

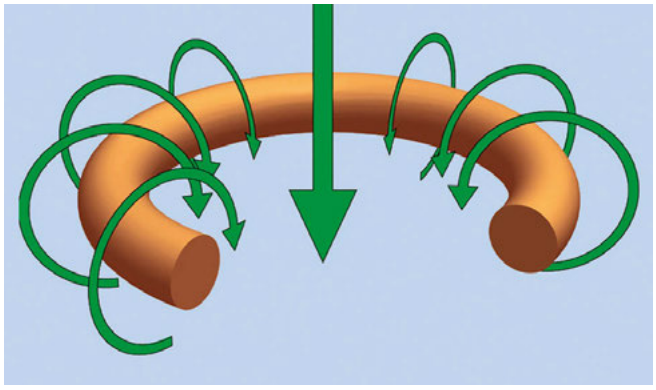


Figure 24-17. *Quand le conducteur est replié pour former un cercle, la force magnétique cumulative se concentre au centre du cercle, comme l'indique la grande flèche.*

L'unité de base de l'inductance est le henry, choisi en souvenir d'un pionnier américain de l'électricité, Joseph Henry. C'est une unité de forte valeur (comme le farad) ; la formule de la figure 24-18 exprime la valeur de l'inductance en microhenrys (µH). Comme vous le devinez, il y a 1 000 000 de microhenrys dans un henry.

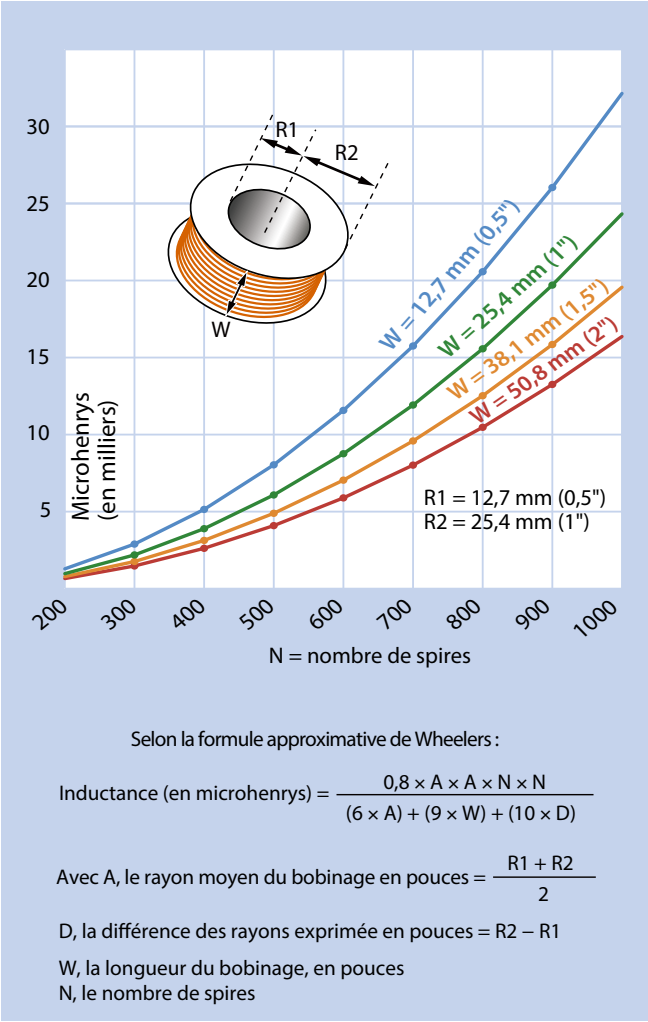


Figure 24-18. *Représentation graphique montrant l'influence des dimensions et du nombre de tours sur la valeur de l'inductance d'une bobine, calculée approximativement à l'aide d'une formule simple.*

Vous pouvez voir, sur le graphique, que si vous conservez les dimensions d'une bobine et doublez le nombre de spires (en utilisant un fil plus fin ou du fil ayant un isolant plus fin), la valeur de l'inductance augmente d'un facteur de quatre. Cela est dû à l'élévation au carré du nombre de tours (N × N) dans la formule.

Voici quelques notions à retenir :

- L'inductance augmente avec le diamètre de la bobine.

- L'inductance augmente selon le carré du nombre de spires.
- Si le nombre de spires reste identique, l'inductance sera plus faible si la bobine est mince et longue, et sera plus importante si elle est regroupée en plusieurs couches et courte.

Fondamentaux : notions de base et symboles des inductances

Examinez les symboles des bobines de la figure 24-19. Les deux symboles du haut représentent une bobine avec un noyau à air, (le premier symbole étant plus ancien que le second). Les deux symboles du bas schématisent un bobinage réalisé autour d'un noyau, respectivement de fer (en bas et à gauche) ou en particules de fer ou d'une ferrite (en bas et à droite).

Si vous mesurez le champ magnétique créé par une bobine alimentée par une source de courant continu positive d'un côté et négative de l'autre, le champ s'inversera si vous inversez les polarités de l'alimentation. Cependant, vous ne remarquerez aucune différence si vous attirez un trombone, car le champ magnétique induit un champ magnétique de polarité opposée dans le trombone.

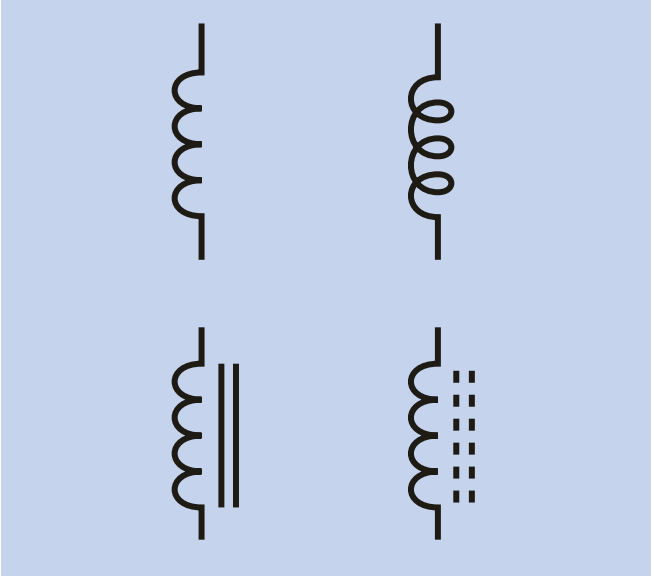


Figure 24-19. *Symboles de schématique représentant une bobine.*

Les transformateurs, où le courant alternatif appliqué à une bobine induit un courant alternatif dans l'autre, sont sans doute l'application la plus répandue des bobines. Si l'enroulement ***primaire*** (l'entrée), possède la moitié des spires de l'enroulement ***secondaire*** (la sortie), la tension délivrée sera doublée et l'intensité divisée par deux, en supposant que le transformateur soit efficace à 100 %.

Historique : Joseph Henry

Né en 1797, Joseph Henry a été le premier à étudier et à démontrer la puissance des électroaimants. Il est aussi à l'origine du concept « d'inductance », selon lequel « l'inertie électrique » est une propriété d'une bobine de fil, quand elle s'oppose à une impulsion électrique.

Henry débuta dans un laboratoire d'Albany (état de New-York). Il travailla dans un commerce d'alimentation, avant de devenir apprenti chez un horloger, mais il souhaitait devenir comédien. Ses amis l'ont persuadé de s'inscrire à l'Académie d'Albany, où se révélèrent ses aptitudes pour la science.

En 1826, il y est nommé professeur de mathématiques et de philosophie naturelle, sans être pour autant diplômé. Il se décrivait d'ailleurs lui-même comme un autodidacte. Michael Faraday faisait des travaux similaires en Angleterre, mais Henry ne le savait pas.

Figure 24-20. *Joseph Henry est un scientifique américain, pionnier des recherches en électromagnétisme.*

Henry obtient un poste à Princeton, en 1832, il touche alors un salaire de 1 000 $ par an et il est hébergé gratuitement. Quand Morse tente de breveter le télégraphe, Henry certifie qu'il en connaissait déjà le concept. En effet, il avait conçu un dispositif similaire pour prévenir son épouse à son domicile, quand il travaillait dans son laboratoire du Philosophical Hall.

Outre la physique, Henry enseigna aussi la chimie, l'astronomie et l'architecture. La science n'étant pas alors compartimentée en spécialités comme aujourd'hui, il s'intéressa à des phénomènes aussi divers que la phosphorescence, le son, la capillarité et la balistique. En 1846, il devint le secrétaire du Smithsonian Institute, récemment fondé.

Expérience 25
Un générateur de tension

Dans l'expérience 24, vous avez utilisé le courant électrique pour générer un champ magnétique. Nous allons maintenant étudier comment générer de l'électricité à partir d'un champ magnétique.

Vous aurez besoin de :

- 1 pince coupante, une pince à dénuder, des fils de tests, un multimètre
- 1 aimant cylindrique au néodyme de 5 mm de diamètre et 35 mm de long, magnétisé selon son axe
- environ 60 m de fil de câblage de jauge AWG 22, 24 ou 26
- 1 LED
- 1 condensateur de 1 000 µF
- 1 diode signal 1N4148 ou similaire

En option :

- 1 aimant cylindrique au néodyme de 20 mm de diamètre et de 25 mm de long ou plus, magnétisé axialement
- 1 tige de bois de 13 mm de diamètre et 150 mm de long ou plus
- 1 vis à tôle à tête plate, de diamètre 3 mm
- 1 morceau de tube en PVC de diamètre intérieur 20 mm et de longueur minimum 150 mm
- 2 morceaux de contre-plaqué de 6 mm d'épaisseur, d'environ 100 × 100 mm et une scie à cloche de 13 mm ou un foret Forstner pour percer un trou dans le contre-plaqué. Du carton renforcé peut également convenir. Voir le détail dans le texte.
- 1 bobine de fil émaillé de diamètre 0,4 mm, d'environ 120 m

Marche à suivre

Pour commencer, il vous faut un aimant au néodyme, puissant et relativement peu coûteux, si vous choisissez le petit modèle cylindrique indiqué dans la liste des pièces. Enroulez une dizaine de tours de fil de jauge AWG 22 autour, en serrant les spires (figure 25-1). Laissez ensuite le fil se détendre, afin que l'aimant puisse coulisser à l'intérieur de l'enroulement.

Réglez votre multimètre pour la mesure des millivolts AC (pas DC, car nous allons détecter des impulsions électriques alternatives). Dénudez légèrement les extrémités de la bobine et utilisez des fils munis de pinces crocodiles pour relier votre multimètre. Prenez l'aimant entre le pouce et l'index, puis déplacez-le de part et d'autre à l'intérieur de la bobine. Vous devriez mesurer une tension de 3 mV à 5 mV. C'est faible ; ce petit aimant associé à une bobine de dix spires ne peut générer que quelques millivolts.

Peut-être craigniez-vous que l'aimant perde de sa puissance en générant de l'électricité, mais il n'en est rien. Vous communiquez de l'énergie à l'aimant en l'agitant. L'aimant transmet son énergie au fil du bobinage, puis au multimètre, mais il ne perd pas ses propriétés.

Essayez de bobiner davantage de fil en superposant les couches, comme sur la figure 25-2. À nouveau, déplacez rapidement l'aimant. Vous devriez constater que vous générez une tension plus importante.

Dans l'expérience précédente, j'ai indiqué que si le courant passait dans plus de spires de fil, le champ magnétique induit était plus important. Cela est également vrai dans le sens inverse :

> *Une bobine ayant davantage de spires générera une tension plus importante quand un aimant se déplacera en son centre*

Ceci me conduit à penser que si nous avions une bobine plus volumineuse, ayant beaucoup de spires, et un aimant plus puissant, il serait peut-être possible de générer assez de courant pour alimenter un dispositif, par exemple une LED ? Je décris cet essai de façon optionnelle, dans la suite de cette expérience, car des fournitures additionnelles sont nécessaires.

Allumer une LED

De façon générale, une bobine est plus puissante quand elle contient davantage de spires pour un même encombrement. Le *fil de cuivre émaillé* est spécialement prévu pour la réalisation des bobines. C'est un fil de cuivre fin, enrobé d'un vernis isolant permettant de réaliser des enroulements de forte densité.

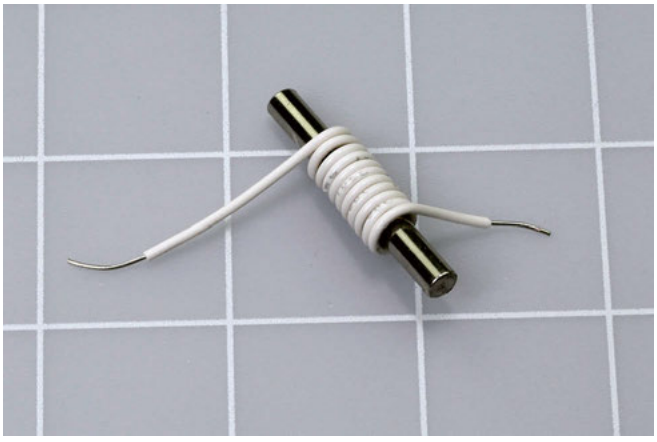


Figure 25-1. *Dix spires de fil suffisent à créer un potentiel électrique quand un aimant se déplace à l'intérieur.*

Figure 25-2. *En déplaçant l'aimant, la tension mesurée sera plus importante si l'on ajoute des spires.*

Figure 25-3. *Bobinage de 200 spires de fil de câblage sur une bobine faite maison et un aimant plaqué sur une vis fixée sur une tige en bois.*

Le fil émaillé serait idéal pour cette expérience, mais je crains que vous n'ayez pas envie d'acheter une bobine de 150 m de fil que vous n'utiliserez plus ensuite.

Je vais utiliser du fil de jauge AWG 22, car vous en avez déjà utilisé pour les autres expériences. Ce type de fil permet de réaliser une bobine qui pourra générer suffisamment de courant pour allumer une LED. Ce sera très juste, suivez les instructions à la lettre.

Pour réaliser cette expérience, vous avez besoin de 60 mètres de fil de câblage de jauge AWG 22. Vous le trouverez parfois en bobines de 30 m que vous pourrez réunir pour obtenir 60 m de fil durant l'opération de bobinage. Réunir les deux longueurs de fil se fera simplement en dénudant leurs extrémités et en les torsadant, il est inutile de les souder.

> *Pour créer un champ magnétique avec un bobinage filaire, toutes les spires doivent être bobinées dans le même sens.*

Pour provoquer l'allumage de la LED, il vous faut un aimant plus puissant. Celui que j'ai utilisé est cylindrique de diamètre 20 mm et de longueur 25 mm, et il est magnétisé selon son axe, c'est-à-dire que ses pôles nord et sud sont aux extrémités opposées de son axe. (L'axe est la ligne imaginaire située au centre du cylindre. Vous pouvez imaginer que le cylindre est une tige tournant autour de son axe.)

Vous aurez également besoin d'une bobine percée en son centre par un trou suffisamment grand pour y faire coulisser l'aimant. Dans votre magasin de bricolage, vous pourrez trouver du tube en PVC dont le diamètre intérieur est légèrement supérieur à 20 mm. Cela permettra à l'aimant de se déplacer librement. Les dimensions de ces tubes ne sont pas très précises. Emportez votre aimant lors de l'achat du tube, afin de vérifier qu'il convienne. Si une taille de tube est un peu trop juste, essayez la taille supérieure. J'ai remarqué que le tube gris pour les conduits électriques était légèrement plus petit que celui d'un tuyau d'eau.

J'ai utilisé du contreplaqué de 6 mm d'épaisseur pour réaliser les flasques de ma bobine, mais tout autre matériau non magnétique pourra convenir. Si vous utilisez du carton renforcé, il doit être épais et rigide.

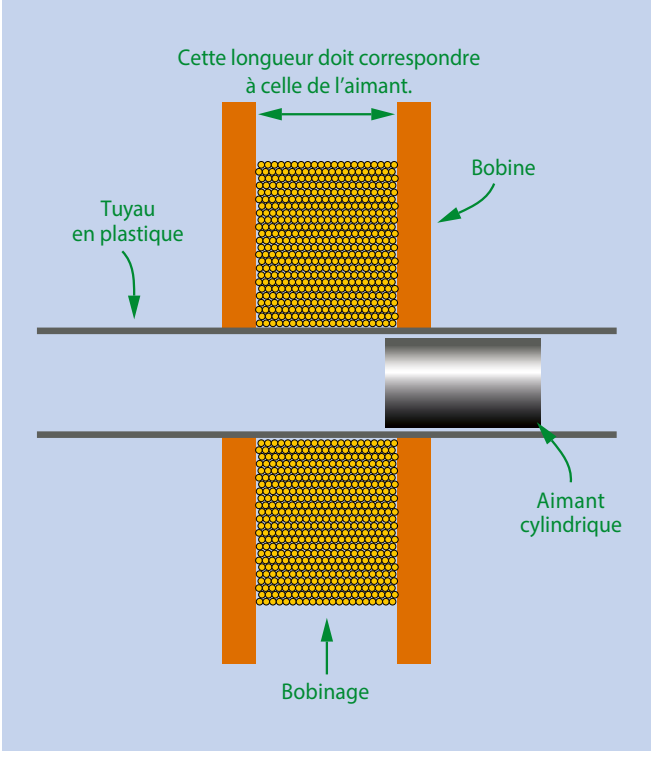


Figure 25-4. *Montage produisant assez d'énergie pour allumer une LED.*

Les dimensions de votre bobinage sont importantes. Les flasques doivent avoir un diamètre minimum de 10 cm,

et leur espacement environ 25 mm. Le fil que vous allez bobiner entre les flasques aura tendance à pousser les disques vers l'extérieur, au fur et à mesure que vous l'enroulerez Les flasques doivent donc être solidement fixées sur le tube central. N'utilisez pas de vis ou boulons, car ils perturberaient le champ magnétique de l'aimant. J'utilise de la colle époxy pour fixer les flasques sur le tube.

Quand vous serez prêt à commencer le bobinage, pensez à percer un trou sur une des flasques, près du tube central, afin de pouvoir y faire passer l'extrémité du fil. Maintenez fermement la bobine pendant que vous enroulez le fil, essayez de faire un enroulement régulier afin de minimiser la place perdue.

Le tube doit faire environ 10 cm de longueur afin que l'aimant puisse s'y déplacer selon trois positions :

1. Quand l'aimant est à une extrémité du tube, il doit être totalement à l'extérieur de la bobine.

2. L'aimant passe au centre de la bobine, il doit être aussi long que la largeur de la bobine.

3. À l'autre extrémité du tube, l'aimant doit également être totalement à l'extérieur de la bobine.

Figure 25-5. *Bobine de fil émaillé dont le fil central est accessible (entouré de rouge).*

Pour déplacer correctement l'aimant, j'ai percé un trou à l'extrémité d'une tige de bois de 13 mm de diamètre pour y insérer une vis à bois à tête plate, de longueur 25 mm. La tige est tenue comme une poignée, l'aimant étant maintenu à la vis par son champ magnétique.

Vous pouvez également utiliser l'extrémité de la lame d'un tournevis pour déplacer l'aimant, l'acier du tournevis ne devrait pas trop perturber l'expérience.

Vous pourriez également secouer la bobine pour agiter l'aimant dans le tube.

Utilisez une paire de fils de tests munis de pinces crocodiles pour relier votre multimètre à la bobine, et réglez-le comme précédemment pour la mesure de tensions alternatives. Cette fois, utilisez le calibre 2 V. En agitant l'aimant le plus rapidement possible, vous devriez mesurer une tension d'environ 0,5 à 0,75 V.

Tant de travail pour obtenir une tension inférieure à 1 V !

En fait, votre multimètre fait la *moyenne* de la tension. Chaque impulsion a probablement une tension de pointe supérieure.

Débranchez les fils de votre multimètre et reliez les fils du bobinage à une LED. Une LED rouge, plutôt que bleue ou blanche, vous permettra de mieux voir ce qui se passe, car elle a besoin d'une tension inférieure. Déplacez vigoureusement l'aimant, vous devriez alors voir la LED clignoter.

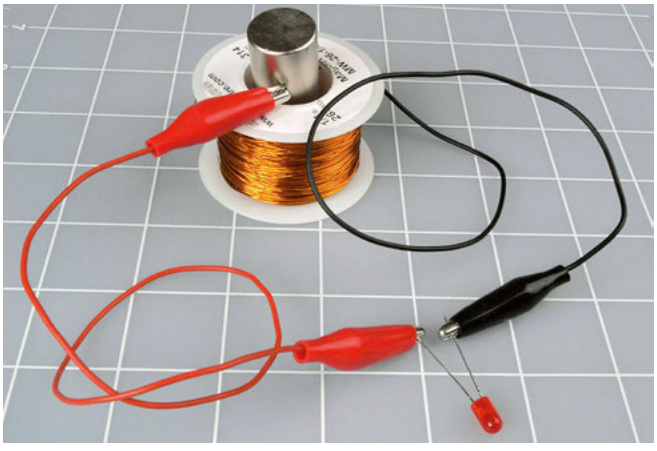


Figure 25-6. *Prêt pour générer de l'énergie électrique à petite échelle.*

Si cela ne fonctionne pas, c'est probablement du fait que l'aimant ne se déplace pas assez rapidement. Essayez

de tenir la bobine par les extrémités du tube central et secouez-la vigoureusement. Toujours rien ? Inversez les fils de la LED, car il se peut que vous agitiez l'aimant plus rapidement dans un sens que dans l'autre, rappelez-vous qu'un aimant est polarisé.

Améliorations possibles

En dépensant un peu plus, vous obtiendrez un résultat plus impressionnant.

En priorité, utilisez un aimant plus puissant. J'ai obtenu des résultats excellents en utilisant un aimant de 15 mm de diamètre et de 50 mm de long. Vous devrez bien entendu utiliser un tuyau de PVC de diamètre supérieur pour y déplacer l'aimant.

Figure 25-7. *Circuit de démonstration produisant un résultat éblouissant*

Ensuite, procurez-vous une bobine de fil émaillé. J'ai utilisé environ 150 m de fil émaillé de 0,4 mm de diamètre. Il est facile d'en trouver sur Internet.

Si vous avez de la chance, votre fil magnétique sera conditionné sur une bobine en plastique dont le diamètre du trou sera légèrement supérieur au diamètre de votre aimant. Mieux encore, l'extrémité du fil à l'intérieur de la bobine pourrait être accessible, près de son centre, comme on le voit, entouré en rouge, sur la figure 25-5.

Pour retirer la fine couche isolante aux extrémités du fil, vous pouvez utiliser du papier de verre extra fin, ou le décaper très, très progressivement avec la lame d'un cutter. Travaillez sous une loupe grossissante pour vous assurer que l'isolant a bien été retiré. Vous pouvez utiliser votre multimètre pour mesurer la résistance de la bobine entière qui ne devrait pas dépasser 100 ohms.

Vous pouvez maintenant relier la LED aux extrémités du fil émaillé de la bobine (figure 25-6), puis générer une tension en déplaçant rapidement l'aimant en son centre. La LED devrait s'allumer plus facilement.

Figure 25-8. *Le générateur à LED en action.*

Si la bobine n'a pas la bonne dimension, ou si le fil n'est pas accessible, vous devrez bobiner le fil sur un autre support. Si vous disposez de 150 m de fil, vous devriez pouvoir enrouler environ 2000 spires. À une vitesse de 4 tours par seconde, cela vous prendra environ 500 s, soit un peu moins de 10 mn. C'est faisable !

Un montage plus conséquent que j'ai réalisé à titre de démonstration est visible sur la figure 25-7. L'enroulement de la bobine est recouvert de résine époxy pour éviter qu'il ne se défasse, le tube central a été maintenu solidement dans un bloc de plastique. Mon aimant au néodyme se maintient sur l'extrémité en acier insérée sur un tube en aluminium que l'on peut voir sur la photo. J'ai relié deux LED à forte intensité à la bobine en inversant leur polarité.

Quand l'aimant est déplacé, de haut en bas, les LED permettent d'éclairer le local. Les LED étant reliées en parallèle mais en polarités inversées, elles démontrent que le courant traverse la bobine dans un sens quand l'aimant monte, et dans l'autre quand il redescend. Observez la figure 25-8.

Aimants : attention, danger !

Les aimants au néodyme peuvent se briser. Ils sont fragiles et peuvent se rompre s'ils entrent brutalement en contact avec un matériau métallique ou un autre aimant. C'est pour cela que leurs fabricants recommandent de porter des lunettes de protection pour les manipuler.

Les aimants au néodyme peuvent blesser. Les aimants exercent une force d'attraction qui augmente quand la distance avec un autre objet magnétique est réduite, leur attraction se termine rapidement et violemment. Vous pouvez facilement vous pincer la peau ou vous écorcher (voire pire). Aïe !

Les aimants ne font jamais de pause. En électronique, on considère que si un circuit n'est plus alimenté, il n'est plus nécessaire d'y prêter attention. Les aimants ne se comportent pas de cette façon. Ils ne cessent jamais d'être en interaction avec leur environnement et, s'ils détectent un objet métallique, ils se l'approprient *immédiatement*. Le résultat peut être dangereux, en particulier si l'objet est pointu et si vos mains sont proches.

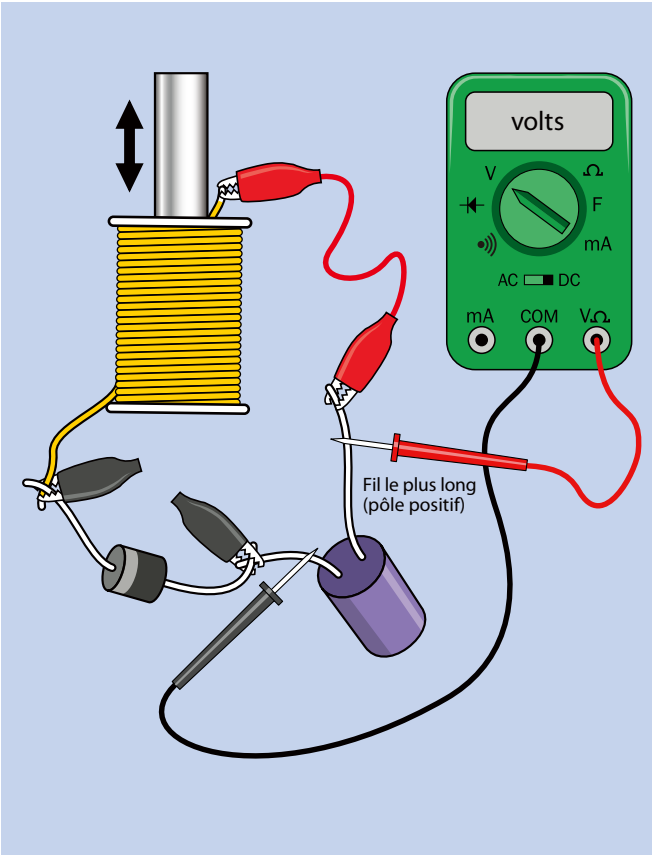


Figure 25-9. *Une diode vous permet d'accumuler dans un condensateur l'énergie générée par votre bobine.*

Quand vous manipulez un aimant, réservez un espace libre suffisant, non magnétique, dépourvu de tout objet métallique, et n'oubliez pas de vérifier sous la surface de travail. Un aimant avait par exemple détecté la présence d'une vis sous le plan de travail de ma cuisine, et l'avait rejointe de façon inattendue.

Il est difficile de prendre ces recommandations au sérieux avant que cela ne se produise. Pourtant, les aimants au néodyme ne sont pas des jouets. Manipulez-les avec précaution.

Souvenez-vous que *les aimants créent des aimants*. Quand le champ magnétique d'un aimant traverse un objet en fer ou acier, l'objet peut acquérir sa propre aimantation. Si vous portez une montre, faites attention de ne pas la

magnétiser. Si vous utilisez un smartphone, tenez-le éloigné des aimants.

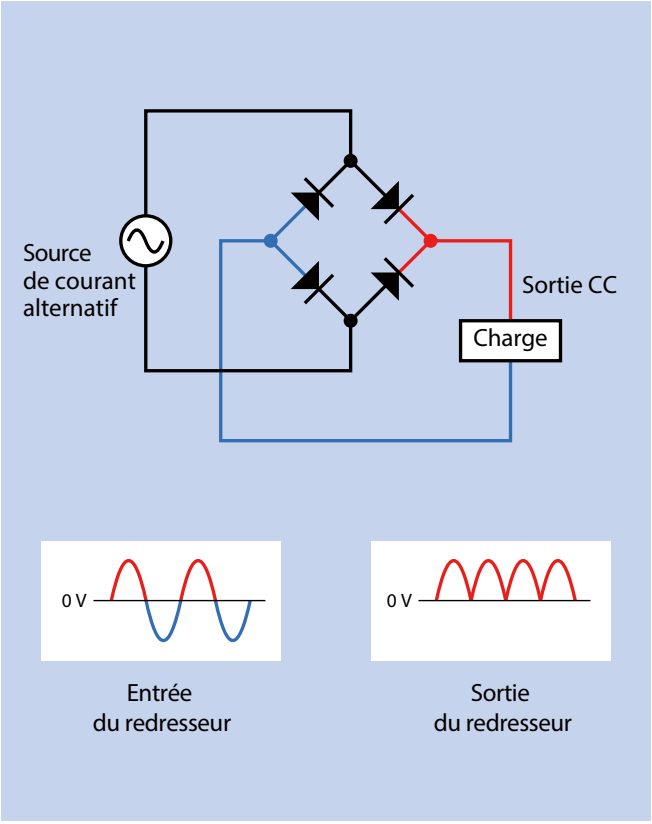


Figure 25-10. *Dans des applications réelles, un pont de quatre diodes peut convertir la tension alternative en courant continu.*

De-même, les disques durs des ordinateurs, les écrans informatiques, sont vulnérables aux puissants champs magnétiques des aimants au néodyme.

Enfin, mais c'est important, les aimants puissants peuvent perturber le fonctionnement des stimulateurs cardiaques (pacemakers).

Charger un condensateur

À partir du montage précédent, voici une autre expérience que vous pouvez réaliser. Déconnectez la LED de votre bobine et remplacez-la par un condensateur de 1 000 µF relié en série avec une diode signal comme sur la figure 25-9. Modifiez le réglage de votre multimètre pour qu'il mesure maintenant une tension continue (en volts), puis reliez-le aux bornes du condensateur.

Si votre multimètre propose un réglage de plage de mesure manuel, ajustez-le pour mesurer une tension d'au moins 2 V. Assurez-vous que la connexion positive de la diode (celle qui n'est pas repérée par un anneau) est bien reliée au pôle négatif du condensateur (le fil qui est repéré), de manière à ce qu'une tension positive traverse le condensateur, en passant par la diode.

Agitez vigoureusement l'aimant de haut en bas au travers de la bobine. Le multimètre devrait indiquer que le condensateur accumule une charge. Quand vous stoppez le mouvement de l'aimant, la tension mesurée devrait faiblir très lentement, principalement parce que le condensateur se décharge dans la résistance interne de votre multimètre.

Cette expérience est plus importante qu'elle n'y paraît. Rappelez-vous que quand vous poussez l'aimant à l'intérieur de la bobine dans une direction, elle induit un courant dans un sens, et que si vous inversez le déplacement de l'aimant, elle induit un courant de sens opposé. Vous générez alors un courant alternatif.

La diode ne laisse passer le courant que dans un sens. Elle bloque son passage dans le sens opposé. C'est pourquoi le condensateur accumule sa charge. Si vous en concluez que les diodes permettent de convertir le courant alternatif en courant continu, vous avez parfaitement raison. On dit que la diode *redresse* la tension alternative.

Une diode unique est un *redresseur demi-onde*, car elle permet le passage de la moitié du courant alternatif, et bloque l'autre moitié.

Pour réaliser un *redresseur pleine-onde*, il faut utiliser un pont à quatre diodes comme sur la figure 25-10. Dans la cadre d'une utilisation réelle, la sortie doit être lissée, des condensateurs sont ajoutés dans ce but.

Poursuivons par l'audio

L'expérience 24 a démontré qu'un courant électrique pouvait créer un champ magnétique. L'expérience 25 a montré que le champ magnétique d'un aimant pouvait générer un courant électrique. Nous pouvons maintenant utiliser ces concepts pour la saisie et la reproduction des sons.

Expérience 26
Démonter un haut-parleur

Vous avez appris que l'électricité parcourant un bobinage pouvait créer une force magnétique suffisante pour soulever un petit objet métallique. Qu'en serait-t-il si la bobine était très légère et l'objet assez lourd ? Dans ce cas, c'est la bobine qui serait déplacée près de l'objet.

Ce principe est au cœur du *haut-parleur* que j'utilise dans ce livre.

Figure 26-1. *Vue arrière d'un petit haut-parleur.*

Figure 25-2. *Petit haut-parleur de 5 cm prêt pour le démontage.*

Après avoir utilisé un haut-parleur dans les expériences précédentes, j'aimerai vous décrire son fonctionnement. Pour cela, la meilleure approche est de le démonter.

Vous préférerez peut-être ne pas dépenser quelques euros dans cette démarche destructive mais éducative : dans ce cas, vous pourrez trouver un récepteur radio en panne dans une brocante et récupérer son haut-parleur. Ou plus simplement, consulter mes photos qui montrent comment s'y prendre, pas à pas.

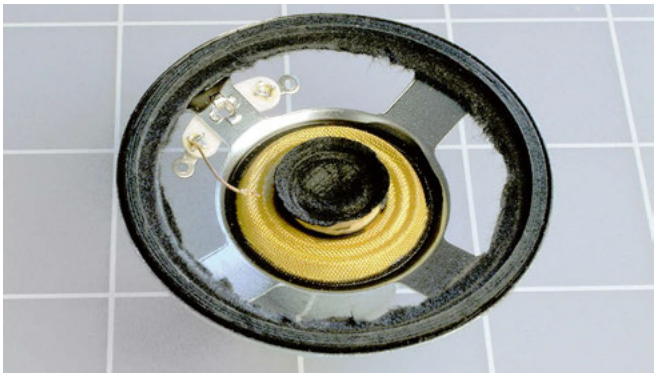


Figure 26-3. *Le haut-parleur sans son cône diffuseur.*

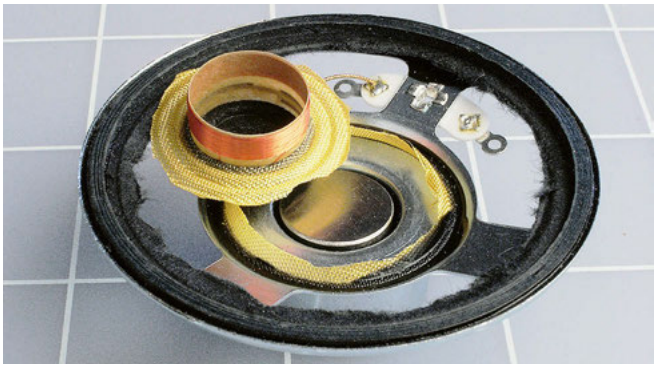


Figure 26-4. *La bobine de cuivre est normalement dissimulée dans l'entrefer de l'aimant situé en dessous.*

Vous aurez besoin de :

- 1 haut-parleur de diamètre minimum 5 cm, le moins coûteux possible
- 1 cutter

Procédure

La figure 26-1 représente l'arrière d'un petit haut-parleur. L'aimant est dissimulé dans la partie cylindrique sertie.

Retournez le haut-parleur face avant orientée vers le haut, comme sur la figure 26-2, découpez le bord externe du cône diffuseur à l'aide d'un cutter, puis découpez le pourtour de la partie circulaire centrale, et retirez le morceau de papier en forme de « O » que vous venez de découper.

Le haut-parleur sans son cône diffuseur est représenté sur la figure 26-3. La couronne ondulée de couleur jaune, au centre, est une pièce flexible qui permet au cône de se déplacer, tout en évitant qu'il ne dévie latéralement.

Figure 26-5. *Ce magnifique haut-parleur Amplion illustre les efforts des concepteurs pour augmenter l'efficacité, à une époque où les amplificateurs audios ne délivraient qu'une puissance limitée.*

Découpez le pourtour de la collerette jaune ; vous devriez alors être en mesure de retirer le cylindre de papier sur lequel est enroulé un fil de cuivre (figure 26-4). J'ai retourné le cylindre, afin que le bobinage soit visible.

Les deux extrémités de ce bobinage reçoivent un signal électrique par l'intermédiaire de deux fils souples reliés à deux cosses situées au dos du haut-parleur. Quand la bobine est placée dans l'entrefer de l'aimant, elle réagit aux fluctuations du signal alternatif en exerçant une force d'attraction et de répulsion sous l'effet du champ magnétique. Ceci fait vibrer le cône du haut-parleur qui crée une onde sonore.

Le fonctionnement des gros haut-parleurs équipant les ensembles stéréophoniques est exactement identique. Ils sont simplement équipés de plus gros aimants et de bobines pouvant supporter une puissance plus importante (pouvant dépasser 100 W).

À chaque fois que je démonte un petit haut-parleur, je suis impressionné par la précision et la miniaturisation de ses éléments constitutifs et la façon dont ils sont produits en masse à un coût aussi faible. J'imagine combien Faraday, Henry et les autres pionniers de la recherche électrique seraient surpris de voir les composants dont nous bénéficions aujourd'hui. Henry a passé des jours entiers à bobiner du fil pour créer des électroaimants qui étaient dix fois plus volumineux, mais bien moins efficaces que ce petit haut-parleur bon marché.

Historique : les origines du haut-parleur

Comme je l'expliquai au début de cette expérience, une bobine se déplacera si son champ magnétique interfère avec un gros objet immobile. Si cet objet est un aimant permanent, la bobine réagira plus intensément, créant des vibrations plus importantes. C'est comme cela que fonctionne un haut-parleur.

L'idée est venue, en 1874, à Ernst Siemens, un inventeur allemand fécond, qui a également construit le premier ascenseur électrique, en 1880. Aujourd'hui, Siemens AG est l'une des plus grandes sociétés d'électronique du monde.

Quand Alexander Graham Bell a breveté son téléphone, en 1876, il utilisait le concept de Siemens pour créer les fréquences audibles dans l'écouteur. À partir de cette

époque, la qualité et la puissance des systèmes de reproduction sonore n'ont cessé d'augmenter, jusqu'à ce que Chester Rice et Edward Kellogg de la General Electric publient un article, en 1925, qui jetait les bases des principes encore utilisés de nos jours dans les haut-parleurs.

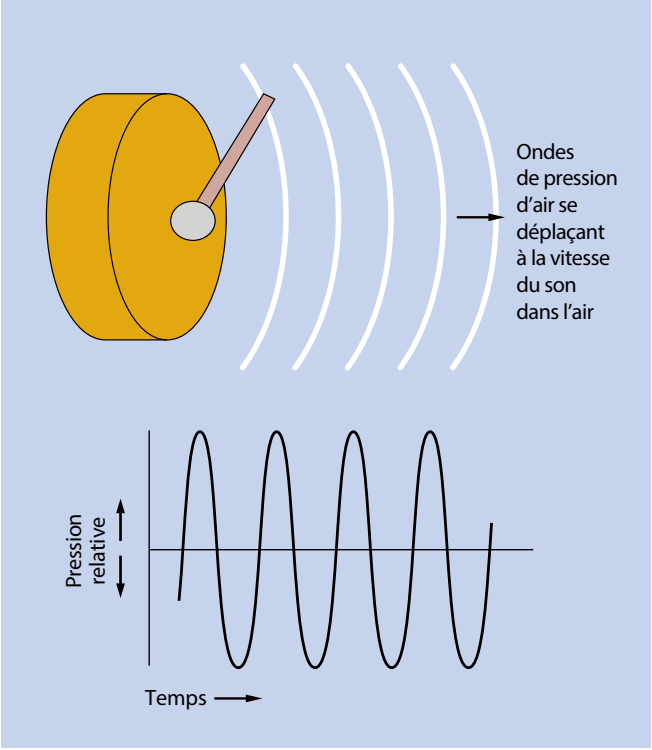


Figure 26-6. *La frappe d'un gong fait vibrer sa surface plate. Les vibrations créent des ondes de pression d'air.*

Sur Internet, vous trouverez des photos de très beaux haut-parleurs anciens, qui utilisaient un pavillon pour augmenter leur efficacité, comme celui de la figure 26-5. Un diaphragme, situé dans le compartiment métallique à la base du pavillon, vibrait sous l'effet du champ magnétique créé par une bobine en fil de cuivre.

Les amplificateurs sonores devenant de plus en plus puissants, l'efficacité des haut-parleurs est devenue moins importante, par rapport à leur qualité sonore et au coût de leur fabrication. Les haut-parleurs actuels ne convertissent en énergie sonore qu'à peine 1 % de la puissance électrique qui leur est appliquée.

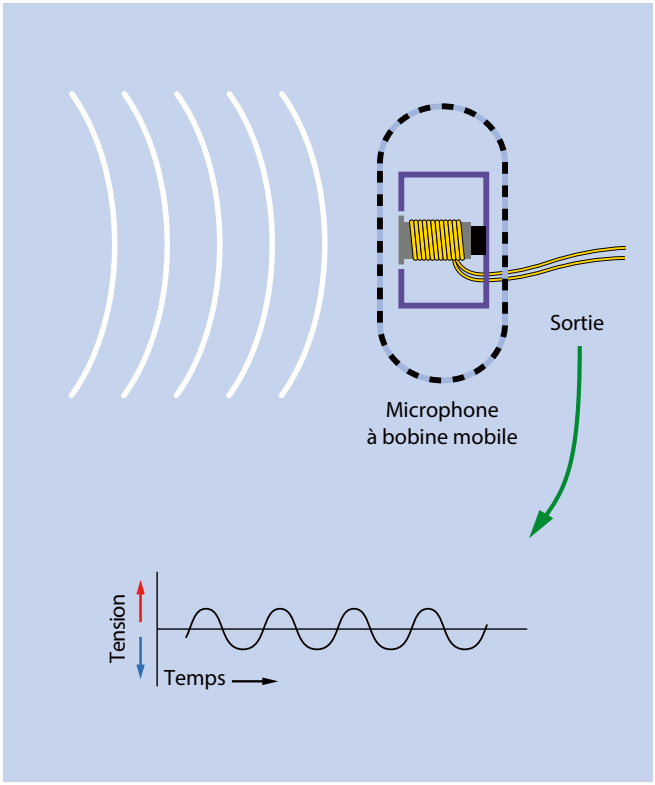


Figure 26-7. *Les ondes sonores, en pénétrant dans un microphone, provoquent la vibration d'une membrane. Celle-ci est solidaire d'une bobine entourant un aimant. Les vibrations de la bobine induisent un faible courant.*

Théorie : son, signal électrique, son

Il est maintenant temps de vous présenter plus précisément comment un son est transformé en électricité puis reconverti en onde sonore.

Supposez que quelqu'un tape sur un gong avec une mailloche, comme sur la figure 26-6. La face métallique plate du gong vibre, créant une onde acoustique audible par l'oreille humaine. Chaque onde comprimant l'air est suivie d'une onde qui le décompresse ; la longueur de l'onde sonore est la distance (généralement exprimée en mètres ou millimètres), qui sépare un pic de pression du suivant.

La fréquence du son est le nombre d'ondes sonores par seconde. Elle est généralement exprimée en hertz.

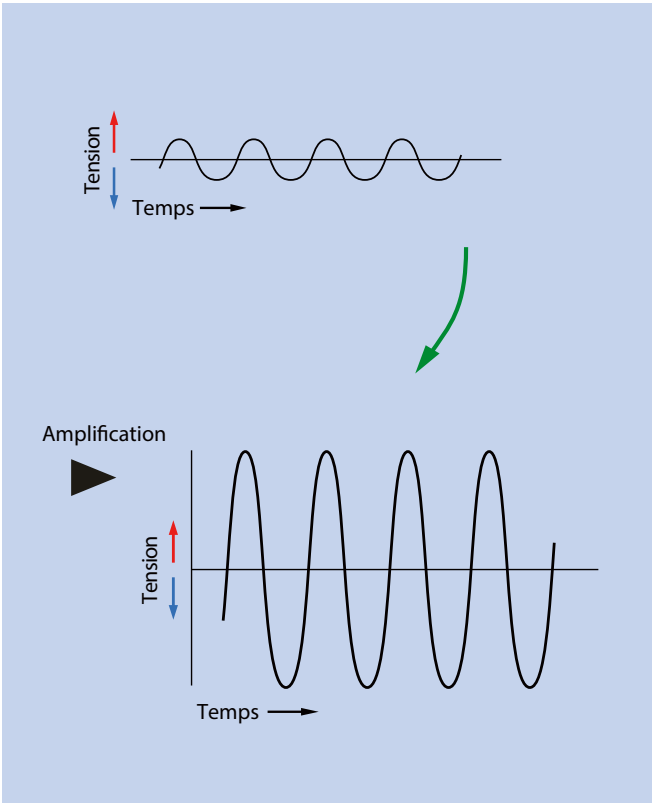


Figure 26-8. *Les faibles signaux du microphone sont amplifiés, ce qui accroît leur amplitude en conservant leur fréquence et leur forme d'onde.*

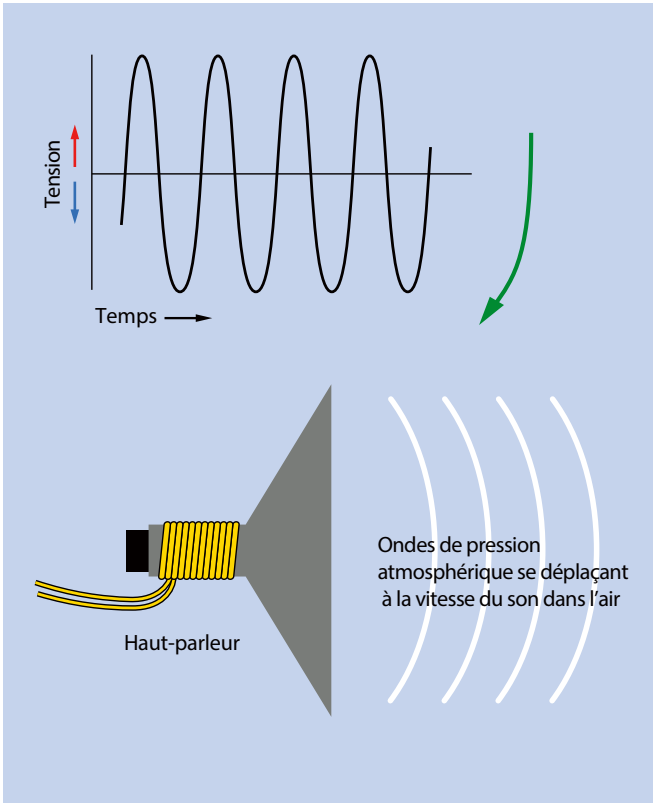


Figure 26-9. *Le signal amplifié est transmis à la bobine d'un haut-parleur. Le champ magnétique induit par le signal provoque la vibration du cône, reproduisant ainsi le son original.*

Imaginons que nous placions une fine membrane en plastique sur le chemin des ondes. Le film de plastique va vibrer au rythme des ondes, comme le mouvement d'une feuille par le vent. Supposons maintenant que nous attachions une bobine au dos de cette membrane, afin qu'elle vibre également, et que nous placions un aimant fixe à l'intérieur de l'enroulement filaire. Cette association ressemble à un petit haut-parleur ultrasensible, sauf que c'est le son qui va produire un signal électrique et non l'inverse. Les ondes de pression vont faire vibrer la membrane selon l'axe de l'aimant et le champ magnétique créera des variations de tension dans l'enroulement. Ce concept est représenté sur la figure 26-7.

Ce dispositif est connu sous le nom de microphone à ***bobine mobile***. Il existe d'autres façons de réaliser un microphone, mais cette configuration est la plus facile à comprendre.

Bien entendu, la tension qu'il engendre est très faible, mais elle peut être amplifiée en utilisant au moins un transistor (figure 26-8).

Le signal amplifié peut alimenter la bobine d'un haut-parleur qui reproduira les ondes sonores, comme sur la figure 26-9.

Il est possible d'enregistrer le son, et de le reproduire ultérieurement, le principe demeure le même. Le plus difficile reste la conception du microphone, de l'amplificateur et du haut-parleur qui doivent chacun reproduire ***fidèlement*** le son. C'est un challenge important qui explique pourquoi la reproduction sonore a mis des dizaines d'années à être perfectionnée.

Expérience 27

Faites réagir une bobine

Lorsqu'un courant traverse une bobine, il crée un champ magnétique. Quand vous interrompez le courant, l'énergie du champ créé est reconvertie en une brève impulsion électrique. On dit que cela arrive quand le champ *s'effondre*.

Cette expérience va vous permettre de le constater par vous-même.

Vous aurez besoin de :

- 1 plaque d'essais, des fils de liaison, une pince coupante, une pince à dénuder, un multimètre
- 2 LED génériques
- 1 bobine d'environ 30 m de fil de câblage de jauge 22 (ou de jauge 24 ou 26)
- 2 résistances de 47 ohms
- 1 condensateur de capacité 1 000 µF ou supérieure
- 2 interrupteurs tactiles

Procédure

Observez le schéma de la figure 27-1 et sa version sur une plaque de montage (figure 27-2). Pour la bobine, vous pouvez enrouler autant de spires que vous le souhaitez, autour de la lame d'un tournevis ou tout autre objet métallique en acier. La grosse bobine de l'expérience 25 conviendra parfaitement.

Le schéma ne semble pas avoir de sens. La résistance de 47 ohms paraît trop petite pour protéger la LED – mais pourquoi la LED s'allumerait-elle, puisque le courant électrique traverse la bobine en l'évitant ?

Testez le circuit, je pense que vous allez être surpris. Chaque fois que vous appuyez sur l'interrupteur, la LED s'allume brièvement. Comprenez-vous pourquoi ?

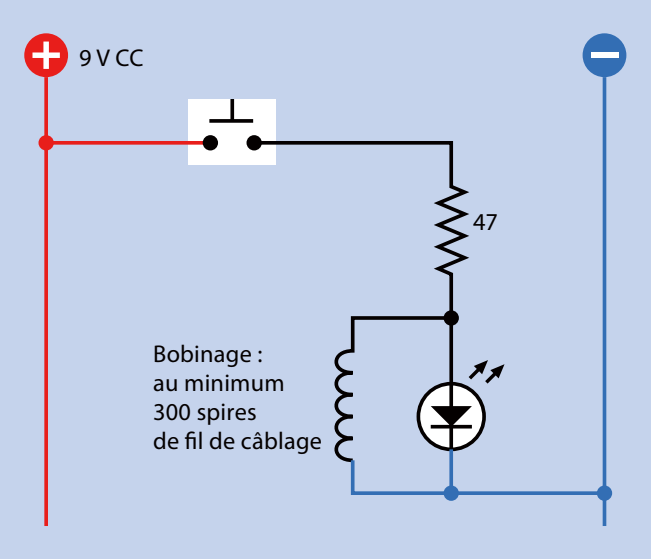


Figure 27-1. *Circuit simple, démontrant l'auto-induction d'une bobine.*

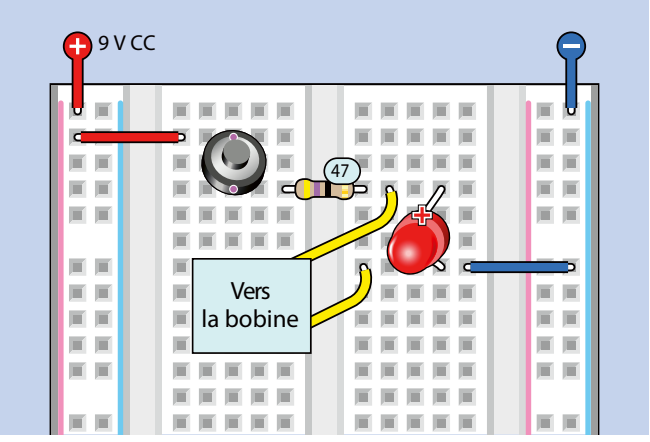


Figure 27-2. *Plaque de montage de l'expérience d'auto-induction.*

Essayez d'ajouter une seconde LED (figures 27-3 et 27-4), en prenant soin d'inverser son sens. Ajoutez la deuxième résistance de 47 ohms et appuyez à nouveau sur le bouton. La première LED s'allume, comme précédemment, mais maintenant, quand vous relâchez le bouton, la seconde LED s'allume brièvement à son tour.

Les LED ne sont pas fortement illuminées, mais elles réagissent à un courant qui les traverse, dans une direction, puis dans l'autre, bien que vous utilisiez une source d'alimentation en courant continu.

Important : n'appuyez pas plus d'une seconde ou deux sur le bouton-poussoir, vous risqueriez de griller la résistance de 47 ohms et de vider rapidement la pile de 9 V.

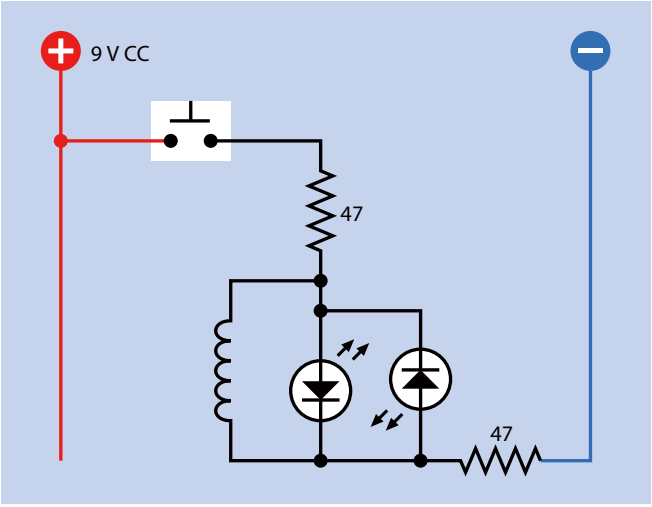


Figure 27-3. *L'une des LED s'allume brièvement quand le champ magnétique se crée, l'autre s'allume quand le champ magnétique s'effondre.*

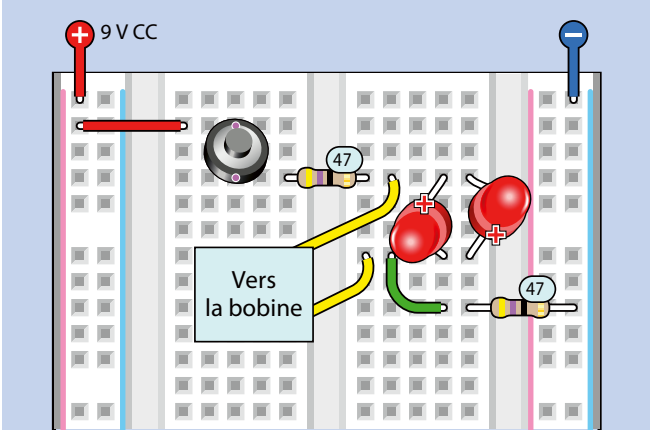


Figure 27-4. *Version montée du circuit de démonstration utilisant deux LED.*

Théorie : l'effondrement du champ

Lorsqu'on applique une tension à une bobine, celle-ci refuse d'abord que le courant la traverse. Ce comportement peu coopératif de la bobine s'appelle l'*auto-induction*. Pendant que la bobine s'oppose au passage du courant, celui-ci l'évite et s'écoule brièvement dans la LED. Finalement la bobine admet le passage du courant qui contourne la LED qui s'éteint.

Certaines personnes utilisent le terme *réactance inductive*, ou plus simplement *réactance*, mais le terme correct est *auto-induction*, c'est celui que j'utiliserai

Quand le courant électrique a traversé la bobine, un champ magnétique a été créé, ce qui consomme de l'énergie. Quand la bobine est déconnectée, le champ magnétique s'effondre et l'énergie est convertie en courant électrique. C'est ce qui produit le bref allumage de la seconde LED quand vous relâchez le bouton-poussoir.

Vous vous rappelez, sans doute, dans l'expérience 20, je vous ai demandé d'ajouter une *diode anti-retour*, en parallèle avec la bobine d'un relais, afin d'absorber la courte impulsion que la bobine génère, quand le relais est désactivé. Il s'agit ici du même phénomène révélé par des LED. Quand la bobine est déconnectée, le champ magnétique créé s'effondre, il se transforme en FEM (force électromotrice). Vous avez pu le constater visuellement.

La quantité d'énergie stockée et libérée dépend évidemment de la taille de la bobine.

Technique : résistances, condensateurs et inductances

En électronique, les trois principaux types de composants passifs sont les résistances, les condensateurs et les inductances. Nous pouvons maintenant énumérer leurs propriétés et les comparer.

- Une *résistance* s'oppose au passage du courant et réduit la tension.
- Un *condensateur* permet à une impulsion de le traverser, mais il bloque le courant continu.
- Une *bobine* (souvent appelée *inductance*) bloque initialement le passage du courant continu, mais en autorise ensuite continuellement le passage.

Dans le circuit que je viens de vous montrer, je n'ai pas utilisé une résistance de forte valeur, car je savais que la bobine ne donnerait qu'une très brève impulsion. L'allumage de la LED aurait été moins visible si j'avais utilisé une résistance de valeur plus habituelle de 330 ohms ou 470 ohms.

N'essayez pas ce circuit sans la bobine, cela détruirait les LED. L'inductance semble ne servir à rien, mais ce n'est pas le cas.

Voici une dernière variante de cette expérience, qui va permettre de vérifier votre mémoire et votre compréhension des phénomènes électriques fondamentaux. Réalisez le nouveau circuit des figures 27-5 et 27-6, utilisant un condensateur de 1 000 µF au lieu de la bobine. Faites attention au respect de la polarité du condensateur, le fil positif devant se trouver vers le haut, et utilisez une résistance de 470 ohms, car la bobine n'est plus présente pour bloquer et dériver le courant.

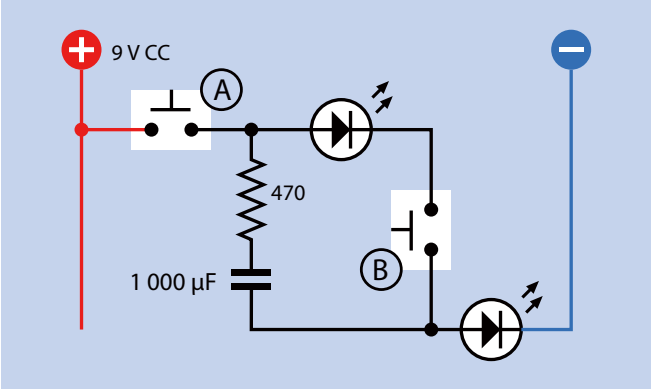


Figure 27-5. *En de nombreux aspects, le comportement d'un condensateur est à l'opposé de celui d'une bobine.*

Pour commencer, maintenez appuyé le bouton B pendant une seconde, afin d'être sûr que le condensateur soit déchargé. Qu'allez-vous observer en appuyant sur le bouton A ? Vous devez être à même de le deviner. Rappelez-vous : un condensateur transmet une impulsion initiale appelée déplacement de courant. En conséquence, la LED du bas va s'allumer – puis graduellement s'éteindre, car le condensateur accumule une charge positive sur son armature supérieure et une charge négative sur son armature inférieure. Pendant ce temps, la tension aux bornes de la LED du bas diminue jusqu'à devenir nulle.

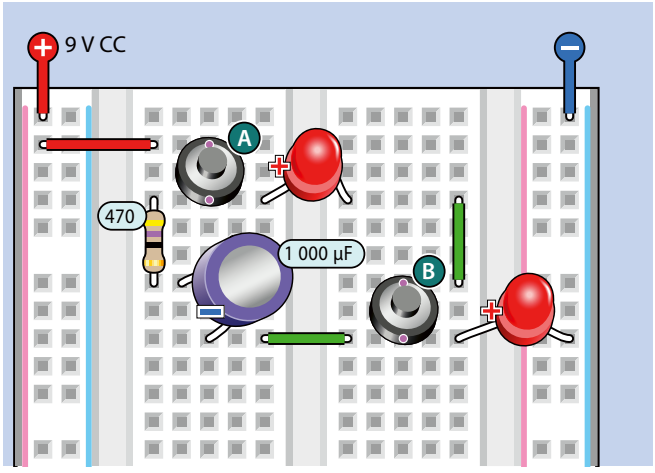


Figure 27-6. *Réalisation du circuit de démonstration avec un condensateur.*

Le condensateur est maintenant chargé. Si vous appuyez sur le bouton B, le condensateur se décharge à travers la LED supérieure. Vous pouvez interpréter cela comme étant l'inverse de l'expérience de la figure 27-1, mais en utilisant un condensateur, au lieu d'une inductance.

Les condensateurs et les inductances accumulent tous deux de l'énergie. Vous avez pu le constater de façon plus évidente avec le condensateur, car un condensateur de forte valeur est beaucoup plus petit qu'une inductance de valeur importante.

Théorie : principes du courant alternatif

Voici une expérience simple. Imaginez que vous configurez un temporisateur 555 pour envoyer un flux d'impulsions au travers d'une bobine. C'est une forme primitive de courant alternatif.

Pensez-vous que l'auto-induction de la bobine interférera avec le flux d'impulsions ? Cela dépendra de la durée de chaque impulsion et de la valeur de l'inductance de la bobine. Si la fréquence des impulsions est correcte, l'auto-induction de la bobine durera juste le temps nécessaire au blocage de chaque impulsion. Puis la bobine récupérera à temps pour pouvoir bloquer la suivante. C'est de cette façon qu'une inductance peut bloquer certaines fréquences tout en laissant passer les autres.

Si vous possédez un système stéréophonique muni de bonnes enceintes acoustiques, chaque enceinte contient probablement deux haut-parleurs : un petit haut-parleur pour reproduire les sons aigus et un plus gros pour reproduire les sons de basses fréquences. Il y a probablement une inductance dans l'enceinte acoustique, pour empêcher les fréquences élevées d'atteindre le gros haut-parleur. Il s'agit d'un *filtre passe-bas*.

Que se passe-t-il si vous remplacez l'inductance par un condensateur ? Si les impulsions alternatives durent suffisamment longtemps par rapport à la valeur du condensateur, il aura tendance à les bloquer. Mais, si les impulsions sont courtes, le condensateur se chargera à leur rythme et les transmettra. Il s'agit d'un *filtre passe-haut*.

La place me manque pour traiter en profondeur les principes du courant alternatif. C'est un domaine vaste et complexe, dans lequel l'électricité se comporte de façon aussi étrange que fascinante. Quant aux supports mathématiques qui le décrivent, ils peuvent s'avérer assez ardus. Je vais vous montrer par la suite, comment le courant alternatif permet la transmission et la réception des ondes radioélectriques.

Expérience 28
Une radio sans soudure ni alimentation

Ce projet décrit un circuit qui permet la réception des ondes radio émises en modulation d'amplitude, sans utiliser d'alimentation. On appelle ce type d'appareil un récepteur à cristal, car les premiers exemplaires utilisaient un minerai de plomb cristallisé (la galène), qui se comportait comme une diode quand la pointe d'un fil rigide était mise en contact avec le cristal. Le concept fut élaboré à la naissance des télécommunications, mais si vous ne l'avez jamais réalisée, vous êtes passé à côté d'une expérience vraiment magique.

Vous aurez besoin de :

- 1 objet cylindrique rigide, d'environ 7,5 cm de diamètre, tel qu'une boîte de comprimés, ou un petit flacon
- 18 m de fil électrique de jauge AWG 22 (0,6 mm de diamètre environ)
- 15 à 30 m de fil électrique souple de jauge 16 (1,3 mm de diamètre environ)
- 1 corde en polypropylène ou en nylon, longue de 3 m
- 1 diode au germanium
- 1 écouteur à haute impédance
- 1 fil de test muni de pinces crocodiles
- 3 pinces crocodiles ou d'autres fils de test

En option :

- 1 source d'alimentation de 9 V CC (pile ou adaptateur secteur)
- 1 circuit intégré amplificateur LM386
- 1 condensateur de 10 µF
- 1 petit haut-parleur (un diamètre de 5 cm conviendra)

La diode doit être de type au germanium, et non au silicium comme celle que vous avez utilisée précédemment. L'écouteur doit être un modèle à haute impédance, au minimum 2000 ohms, différent du type courant utilisé avec un smartphone ou un baladeur MP3. Pour plus de détails, consultez l'annexe A.

Première étape : l'inductance

Vous devez commencer par réaliser un bobinage qui va résonner selon les fréquences de transmission des stations radiophoniques en modulation d'amplitude, en ondes moyennes (parfois appelées petites ondes). La bobine sera constituée de 65 spires de fil de jauge AWG 22, soit une longueur approximative de 18 m.

Vous pouvez bobiner le fil autour d'une bouteille ou d'une boîte cylindrique dont le diamètre est constant, proche de 7,5 cm. Une bouteille d'eau fera l'affaire, si elle n'est pas faite avec du plastique trop fin qui pourrait se briser ou se déformer sous la pression.

Figure 28-1. *Flacon convenant à la réalisation de la bobine. Les trous vont servir à maintenir le fil enroulé autour de la bouteille.*

J'ai, pour ma part, utilisé une boite de vitamines qui avait les dimensions adéquates. Vous verrez sur les photos qu'elle ne comporte pas d'indications, c'est parce que j'ai chauffé délicatement son étiquette (légèrement afin de ne pas faire fondre le flacon), et j'ai ainsi pu la décoller. Les restes de colle ont été retirés avec de l'alcool.

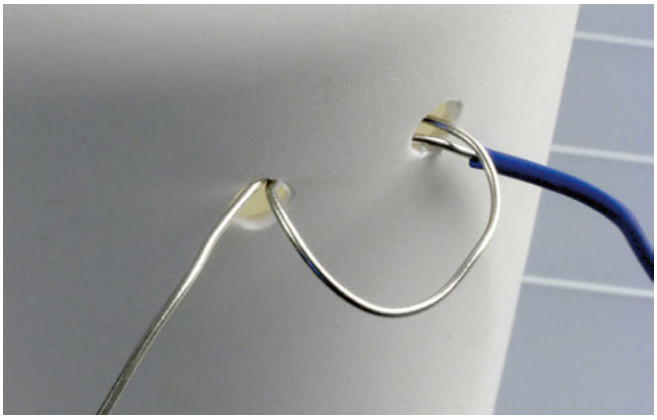


Figure 28-2. *Maintenez une extrémité de votre fil en le faisant passer dans les trous.*

Après avoir préparé une bouteille propre et rigide, utilisez un poinçon ou un clou pour percer deux paires de trous (figure 28-1), qui serviront à maintenir les extrémités du bobinage.

Dénudez une des extrémités de votre fil de câblage et glissez-la dans les trous de la bouteille (figure 28-2). Puis enroulez cinq spires de fil autour de la bouteille et fixez-les temporairement avec un petit morceau de ruban adhésif d'électricien ou de scotch normal. N'utilisez pas de scotch magique invisible, difficile à retirer et qui n'adhère pas suffisamment.

Vous devez maintenant retirer l'isolant de votre fil juste après les cinq spires Utilisez votre pince à dénuder pour sectionner l'isolant plastique au point souhaité, puis faites glisser l'isolant pour dégager le point de connexion (figure 28-3).

Dans l'étape suivante, vous allez torsader la partie dénudée du fil pour former une boucle qui sera plus accessible et empêchera l'isolant de se rétracter (figure 28-4).

Vous venez de créer une *prise intermédiaire* sur votre inductance. Retirez le ruban adhésif que vous avez utilisé pour maintenir temporairement les cinq premières spires, puis

bobinez à nouveau cinq autres spires autour de la bouteille. Utilisez à nouveau du ruban adhésif pour maintenir l'enroulement et créez un second point intermédiaire. Vous devrez en créer ainsi un total de 12.

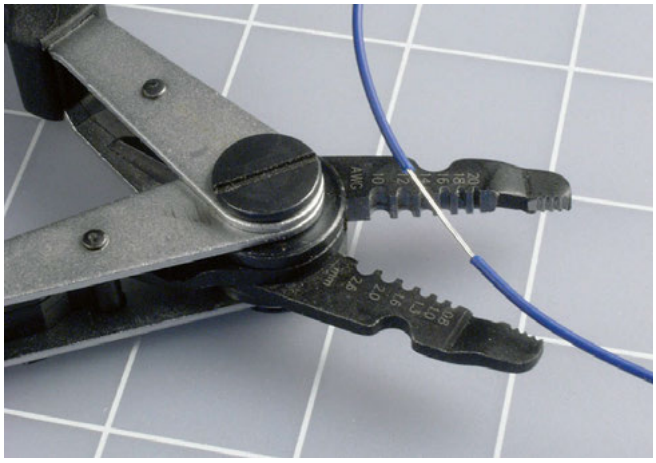


Figure 28-3. *Utilisez votre pince à dénuder et vos doigts pour libérer environ 13 mm d'isolant.*

Ils n'ont pas besoin d'être parfaitement alignés. Quand vous aurez terminé le dernier point intermédiaire, bobinez cinq spires supplémentaires autour du flacon et coupez le fil. Formez un U d'environ 13 mm de diamètre afin de pouvoir le fixer dans les trous que vous avez percés à l'autre extrémité de la bouteille. Glissez le fil dans les trous et faites une boucle pour renforcer sa fixation.

La figure 28-5 montre la bobine que j'ai réalisée autour d'un flacon de vitamines.

L'étape suivante consiste à installer une antenne qui sera réalisée avec un fil de fort diamètre, le plus long possible. Ce sera facile si vous habitez une maison avec un jardin. Ouvrez une fenêtre et jetez une bobine de fil électrique de jauge AWG 16 (diamètre 1,3 mm) en retenant l'extrémité libre du fil, puis à l'extérieur, déroulez la bobine de fil que vous attacherez ensuite à un arbre, une gouttière ou un poteau, à l'aide d'une corde en polypropylène ou en nylon. La longueur totale du fil doit être comprise entre 15 et 30 m. À l'endroit où le fil sort par la fenêtre, attachez-le à une autre corde. La corde sert d'isolant pour maintenir le fil d'antenne le plus loin possible du sol ou de toute masse reliée à la terre.

Si vous n'avez pas de terrain accessible, tendez le fil de votre antenne en le fixant par des morceaux de corde aux cadres des fenêtres, aux poignées des portes, ou à tout autre point d'attache qui l'éloigne le plus possible du sol. Il n'est pas indispensable que l'antenne soit dressée en ligne droite, vous pouvez la suspendre tout autour d'une pièce.

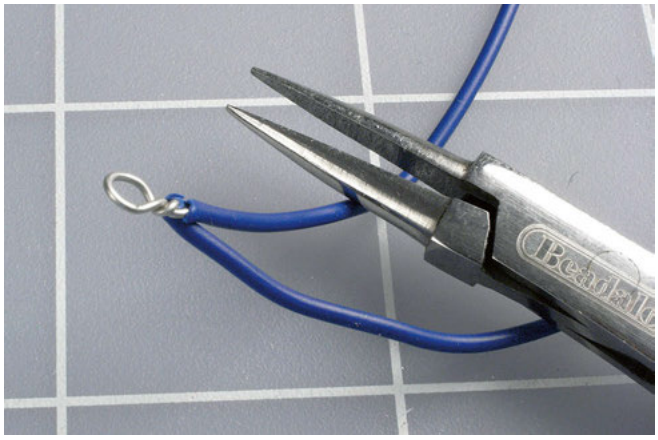


Figure 28-4. *Faites une boucle avec la partie dénudée du fil.*

Attention : haute tension !

Le monde qui nous entoure est rempli d'électricité. On ne s'en rend généralement pas compte, mais un orage soudain nous rappelle qu'il existe un potentiel électrique énorme entre le sol et les nuages.

Si vous avez installé une antenne extérieure, ne vous en servez jamais par temps d'orage, car il est possible qu'un éclair la foudroie. Ce peut être extrêmement dangereux. Si l'orage menace, déconnectez l'extrémité intérieure de votre antenne et laissez-la à l'extérieur en la reliant à la terre pour plus de sécurité.

Antenne et terre

Utilisez un fil de test avec pinces crocodiles pour relier votre antenne à l'extrémité supérieure de l'inductance que vous avez réalisée.

Vous devez ensuite établir une connexion à la terre. Cela revient littéralement à la relier au sol extérieur. Un tuyau d'eau est souvent suggéré pour réaliser une prise de terre ;

c'est une bonne idée, à condition qu'il soit métallique ! De nos jours, de nombreuses installations de plomberie sont faites en tuyaux de plastique. Vérifiez sous l'évier de votre cuisine pour voir s'il s'agit de cuivre ou de plastique avant d'utiliser un robinet comme liaison à la terre.

La meilleure solution serait de relier un fil à la connexion de terre d'une prise électrique, mais il vaut mieux éviter cette possibilité à cause du risque élevé de toucher accidentellement les autres connexions.

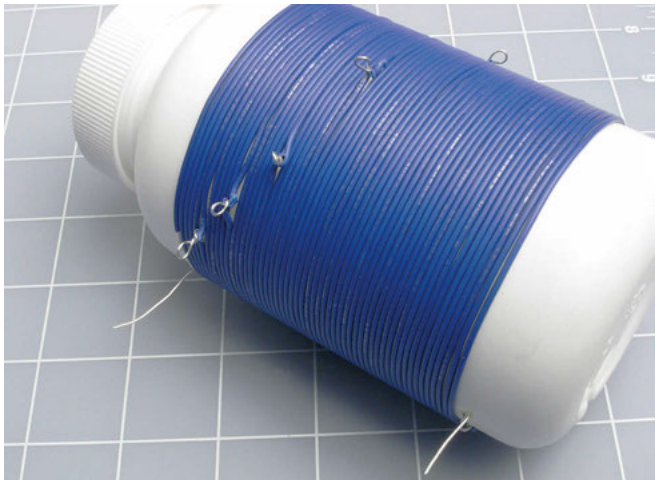


Figure 28-5. *L'inductance terminée, fermement maintenue autour du flacon.*

L'idéal, pour avoir une bonne liaison à la terre, serait d'enterrer une tige métallique recouverte de cuivre, d'environ 60 cm dans le sol humide. Vous trouverez, chez les revendeurs de matériel électrique, des piquets de terre utilisés pour relier les postes à souder à la terre Choisissez la solution qui vous paraît être la plus facile.

Il vous faut maintenant deux composants assez difficiles à trouver : une diode au germanium, qui fonctionne comme une diode au silicium, mais qui est recommandée pour les très faibles tensions et intensités, ainsi qu'un écouteur à haute impédance. Les écouteurs que vous utilisez avec votre baladeur MP3 ne conviendront pas. Il faut que vous trouviez un ancien écouteur, comme celui de la figure 28-6. Si son câble de liaison est équipé d'un connecteur, vous devrez le retirer et dénuder soigneusement l'extrémité du câble.

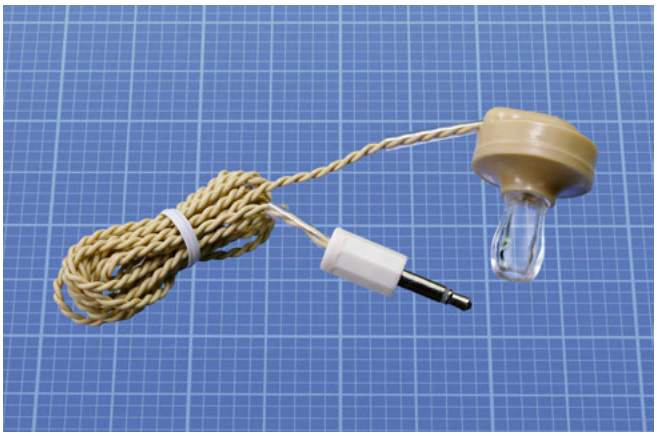


Figure 28-6. *Vous avez besoin de ce type d'écouteur pour votre récepteur radio. Si vous le contrôlez avec votre multimètre, sa résistance devrait être d'environ 2K.*

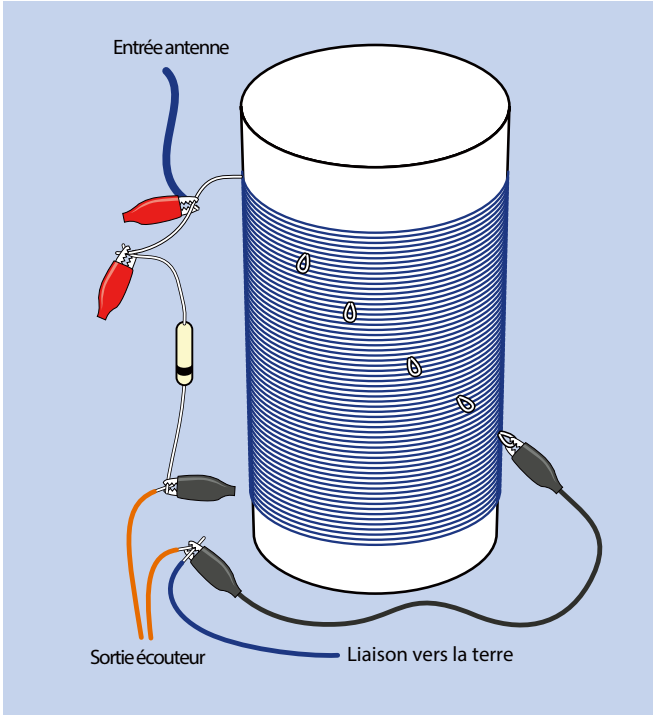


Figure 28-7. *Plan d'assemblage des composants.*

Assemblez les composants à l'aide de fils de tests et de pinces crocodiles (figure 28-7). La version que j'ai réalisée n'est pas aussi belle que mon dessin, mais les connexions sont identiques (figure 28-8). Remarquez que le fil de test, en bas du dessin, peut être relié à n'importe quel point intermédiaire de la bobine. C'est de cette façon que vous allez accorder votre récepteur radio sur la fréquence d'une station de radiodiffusion.

Si vous avez pu suivre ces instructions et si vous habitez à 30 ou 40 km d'un émetteur radiophonique émettant en modulation d'amplitude (petites ondes), vous entendrez faiblement le son émis par les stations de radio – alors même qu'aucune énergie n'est fournie au circuit que vous avez réalisé. Ce projet est vieux de plusieurs décennies, mais le résultat est toujours source d'étonnement et de magie (figure 28-9).

Figure 28-8. *Réalisation de mon récepteur radio.*

Dans les situations suivantes, vous pourriez ne rien entendre : si vous habitez trop loin d'une station d'émission, si vous ne pouvez pas installer une antenne suffisamment longue, ou encore si votre prise de terre n'est pas de suffisamment bonne qualité. N'abandonnez pas pour autant ; attendez la soirée. La réception des fréquences réservées aux stations émettant en modulation d'amplitude s'améliore totalement quand le soleil n'influence plus l'atmosphère par ses rayons.

Pour choisir parmi plusieurs stations, déplacez la pince crocodile du fil de test d'une prise du bobinage à l'autre. Selon l'endroit où vous habitez, vous pouvez recevoir une seule station ou plusieurs une par une ou simultanément.

Vous pensez obtenir quelque chose à partir de rien, mais en fait, vous utilisez l'énergie de l'émetteur de la station de radiodiffusion. Un émetteur diffuse un signal modulé puissant, de fréquence fixe, par l'intermédiaire d'une tour de diffusion. Quand l'ensemble inductance-antenne résonne sur la fréquence émise, vous absorbez suffisamment de tension et de courant pour exciter l'écouteur à haute impédance.

Figure 28-9. *La joie de capter un signal radio à l'aide de composants ultrasimples et sans alimentation.*

Durant la réception des signaux radio, le sol terrestre et l'antenne forment un condensateur, c'est pourquoi vous avez dû réaliser une bonne connexion à la terre. L'émetteur est également relié à la terre. Voir la figure 28-10.

Améliorations

Si vous avez des difficultés à entendre quoi que ce soit dans l'écouteur, essayez de le remplacer par un *transducteur piézoélectrique*, connu sous le nom de reproducteur piézoélectrique, du type de celui de la figure 28-11. Faites attention à vous procurer le bon composant : ce doit être un petit reproducteur sonore « passif ». S'il est décrit sous l'appellation « buzzer », il pourrait comporter un circuit interne qui génère un sifflement quand on l'alimente. Le mot « passif » signifie qu'il n'est qu'un élément reproducteur des fluctuations de la tension qui lui est appliquée.

Appliquez-le près de votre oreille ; vous devriez constater qu'il fonctionne aussi bien, voire mieux qu'un écouteur.

Vous pouvez également amplifier le signal. L'idéal serait d'utiliser un amplificateur opérationnel comme premier étage, car il possède une impédance d'entrée très élevée. Les amplificateurs opérationnels sont décrits dans *L'électronique en pratique 2*, dans lequel j'ai traité ce sujet en profondeur.

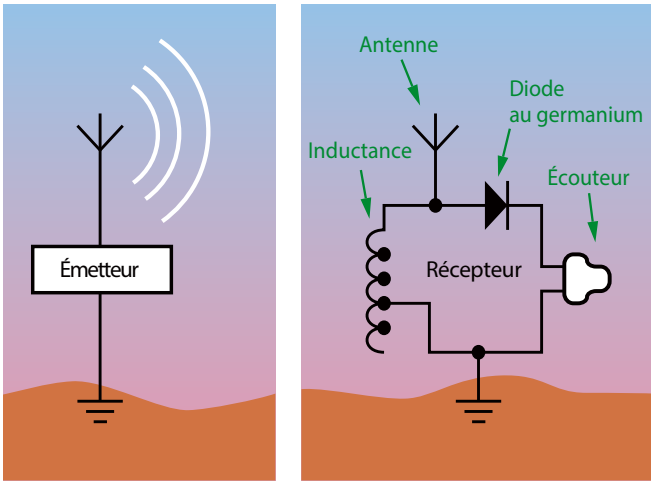


Figure 28-10. *Dépourvu d'alimentation, votre récepteur prélève suffisamment d'énergie en provenance d'un émetteur distant pour créer un signal audible dans l'écouteur. Le sol terrestre ferme le circuit.*

Figure 28-11. *Reproducteur piézoélectrique passif dont le coût est identique à celui du haut-parleur de 5 cm utilisé dans l'expérience précédente, mais sa résistance interne est plus adaptée à votre radio à diode cristal.*

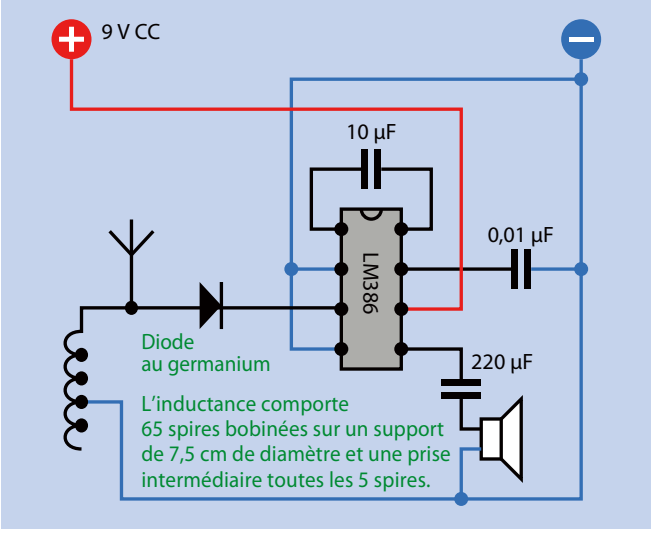


Figure 28-12. *Le circuit intégré amplificateur LM386 permet d'entendre des stations de radiodiffusion par un haut-parleur.*

Dans cette expérience, contentez-vous d'injecter le signal directement à l'entrée d'un amplificateur LM386. La sortie de cette puce peu coûteuse peut piloter un petit haut-parleur.

L'amplificateur ajouté au circuit que vous venez de réaliser se trouve sur la figure 28-12. La diode au germanium est reliée directement à l'entrée du LM386, car je ne pense pas qu'un contrôle de volume sonore soit nécessaire. Faites bien attention à connecter le condensateur de 10 µF entre les broches 1 et 8, afin d'augmenter au maximum le gain du circuit intégré. Même à l'endroit où je vis, à 180 km de Phoenix (Arizona), j'ai pu capter une station émettant depuis cette ville.

Si vous souhaitez améliorer la sélectivité de votre récepteur, ajoutez un condensateur variable, afin d'accorder avec précision la fréquence de résonnance de votre circuit. Les condensateurs variables deviennent rares de nos jours, mais vous en trouverez par exemple chez les fournisseurs Radiospares ou Go Tronic ou même sur eBay. Il vous faudra un modèle de valeur 100 à 200 pF. Vous pourrez également en trouver d'occasion, ils ne vieillissent pas avec le temps. Sur la figure 28-13, le condensateur variable se trouve au centre du circuit.

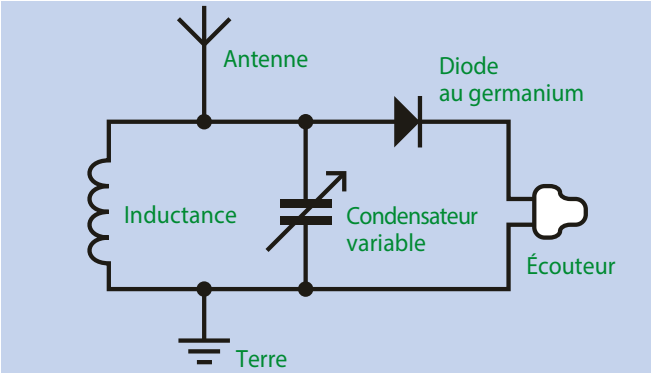


Figure 28-13. *L'ajout d'un condensateur variable au circuit précédent permet une meilleure discrimination des signaux reçus.*

Théorie : fonctionnement d'un récepteur radio

Les radiations électromagnétiques à haute fréquence peuvent parcourir des milliers de kilomètres. Pour réaliser un émetteur radio, on peut utiliser un temporisateur 555 fonctionnant par exemple à la fréquence de 850 kHz (c'est-à-dire 850 000 cycles par seconde) et dont le signal de sortie serait envoyé à l'entrée d'un amplificateur de grande puissance relié à une tour de transmission, ou plus simplement, à un fil de grande longueur. S'il vous était possible de bloquer toute l'activité électromagnétique dans l'atmosphère, vous pourriez détecter ce signal et l'amplifier.

C'est à peu près ce que fit Guglielmo Marconi durant son expérience révolutionnaire, en 1901, mais pour créer les oscillations, il utilisait un simple éclateur générant une étincelle, au lieu d'un temporisateur 555. Ces transmissions n'étaient guère utiles, car elles n'avaient que deux états : émission ou silence. Seule la transmission de messages en code Morse était possible. La photo de Marconi se trouve sur la figure 28-14.

Cinq années plus tard, le premier signal audio était transmis. Un signal de fréquence audible ayant trop peu d'énergie pour être diffusé depuis un émetteur, le signal audio devait être ajouté à un signal à haute fréquence que l'on nomme *porteuse*.

Figure 28-14. *Guglielmo Marconi, grand pionnier de la radio (source : Wikimedia Commons).*

La puissance de la porteuse varie selon les pics et creux du signal audio comme le montre la figure 28-15. On peut définir cela en disant que le signal audio *module l'amplitude* de l'onde porteuse. Les lettres AM de « radiodiffusion AM » signifient « modulation en amplitude ».

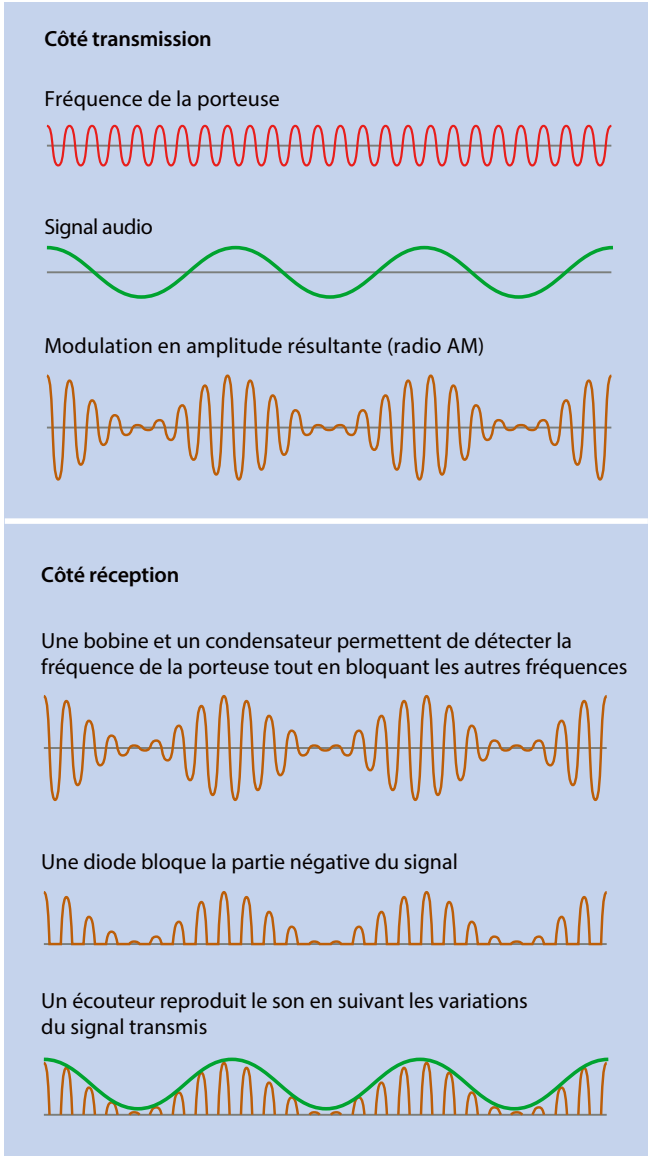


Figure 28-15. *Utilisation d'une onde porteuse de fréquence fixe pour transmettre un signal audio. En réalité, la fréquence de la porteuse est beaucoup plus élevée par rapport à celle du signal audio de cette figure, mais le principe reste identique.*

Du côté du récepteur, l'utilisation conjointe d'un condensateur et d'une inductance permet de détecter la fréquence de la porteuse parmi les autres signaux du spectre électromagnétique. Les valeurs du condensateur et de la bobine doivent être choisies afin que le circuit qu'ils forment résonne à la même fréquence que celle de l'onde porteuse.

Un écouteur ne peut pas s'accommoder de la fréquence de la porteuse. Il n'aurait pas le temps de réagir, resterait perplexe entre les pics et les creux du signal et ne reproduirait aucun son.

Une diode permet de résoudre le problème en supprimant la moitié du signal, ne conservant que les variations positives du signal. Bien qu'elles soient d'amplitude faible et rapides, elles sont toutes positives et l'écouteur en prend la moyenne et reconstruit ainsi approximativement le signal d'origine.

Chaque impulsion de la porteuse de l'émetteur radio est d'abord bloquée par l'auto-induction de la bobine et son énergie charge le condensateur. Si une impulsion négative de même valeur est reçue à un intervalle correctement synchronisé, selon les valeurs de la bobine et du condensateur, cela coïncidera avec la phase de décharge du condensateur et de conduction de la bobine. De cette façon, le circuit résonne. Simultanément, les variations du signal de la porteuse au rythme des fréquences audibles sont traduites en variations de tension dans le circuit.

En ce qui concerne les autres fréquences captées par l'antenne, les plus élevées seront bloquées par la bobine, alors que les autres traverseront la bobine pour être écoulées vers la terre. Elles seront littéralement « rejetées ».

La bande de fréquences allouée à la transmission des stations radio commerciales en *petites ondes* s'étend de 525 kHz à 1 700 kHz environ, avec une séparation de 10 kHz entre chaque station.

De nombreuses fréquences en dehors de cette bande sont utilisées pour des besoins spécifiques. Il n'est pas très difficile de passer l'examen permettant d'obtenir une licence de radioamateur. Équipé d'un appareil adéquat et d'une antenne bien dégagée, il vous serait alors possible de communiquer en temps réel avec des amateurs du monde entier, plutôt que d'attendre de recevoir des e-mails.

Expérience 29

Quand le matériel rencontre le logiciel

La fin de ce livre va traiter des microcontrôleurs que vous pouvez considérer comme des calculateurs de la taille d'un circuit intégré, particulièrement utile pour le contrôle de gadgets mécaniques ou électriques. Quand un four à micro-ondes bipe pour vous avertir que vos aliments sont cuits, c'est un microcontrôleur qui le contrôle. Dans le système antiblocage des freins (ABS) d'une voiture, c'est un microcontrôleur qui supervise son comportement, pendant qu'un autre ajuste l'injection de carburant. Les caméras, les moniteurs de pression sanguine, les machines à laver, contiennent tous des microcontrôleurs.

Quand vous utilisez un ordinateur portable, les caractères saisis par le clavier sont affichés sur l'écran. Un microcontrôleur agit à un niveau inférieur, souvent en interaction avec les composants que vous avez appris à connaitre dans ce livre, comme le montre la figure 29-1.

Le succès des microcontrôleurs a conduit à la conception de petites cartes, comme le Raspberry Pi ou le BeagleBone, chacun appartenant à la catégorie des ***ordinateurs mono-carte*** (*SBC*, *Single Board Computers* en anglais) dont la sophistication dépasse les objectifs de cet ouvrage.

Un microcontrôleur est à la base un dispositif à un seul circuit intégré. Quand un programme est chargé dans le circuit intégré, les instructions du programme permettent de rendre ses broches de sortie hautes ou basses, comme les sorties d'une puce logique. La sortie peut piloter un transistor ou un relais solide pour activer un gadget de votre choix.

D'autres broches du microcontrôleur peuvent être configurées pour recevoir des signaux d'entrée permettant de détecter quand un bouton-poussoir a été activé. Le microcontrôleur contient également des ***convertisseurs analogiques-numériques***, qui convertissent une entrée fluctuant constamment, en valeurs numériques qu'un programme peut traiter.

Pour pouvoir effectuer ces tâches, un microcontrôleur a besoin d'un programme pour lui indiquer ce qu'il doit faire. À l'apparition des microcontrôleurs, les programmes devaient être écrits en langage assembleur, spécifique à chaque puce, mais depuis les années 2000, tout a commencé à évoluer.

Technique : introduction à l'Arduino

Le premier Arduino a été introduit en 2005, c'était une petite carte à circuit imprimé sur laquelle était implanté un microcontrôleur. Arduino ne fabriquait pas le circuit intégré utilisé, il provenait d'une société nommée ATmel qui le produisait. La valeur ajoutée par Arduino était principalement le logiciel utilisant une version limitée du langage C++ auquel je me réfèrerai en tant qu'Arduino C. Cette combinaison de matériel et de logiciel s'appelle maintenant un système de développement, car on peut l'utiliser pour développer ses propres applications.

En 2005, beaucoup de personnes savaient écrire des programmes en C++, ils ont ainsi pu rapidement adopter l'Arduino et créer une nouvelle communauté d'utilisateurs.

Les participants se partageaient des petits programmes sauvegardés dans des bibliothèques accessibles en ligne. Si aujourd'hui, vous souhaitez par exemple contrôler une maquette d'avion par un servo-moteur, vous pouvez télécharger, depuis une bibliothèque, le code réalisant exactement ce que vous souhaitez, écrit par quelqu'un d'autre.

Personnellement j'ai toujours préféré suivre mon propre chemin, et comme ce livre indique comment faire les choses par vous-même, je pense que vous aurez envie d'écrire vous-même vos programmes, en partant de rien. Ayant cela en tête, je vais vous initier aux premiers pas, vous montrant comment cela se passe. Si vous trouvez cela intéressant, vous devrez continuer en suivant une démarche entièrement dédiée à la programmation.

Commençons par voir pourquoi j'ai choisi d'utiliser un système Arduino, plutôt que tout autre système de développement.

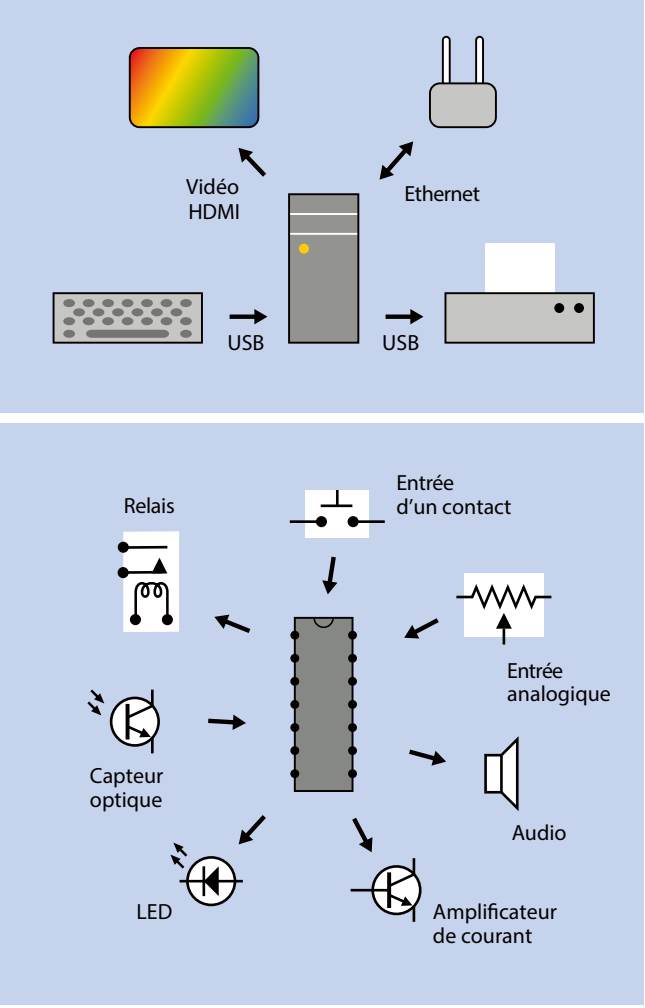


Figure 29-1. *Comparaison entre les entrées-sorties d'un ordinateur (en haut) et celles d'un microcontrôleur (en bas).*

Quel microcontrôleur ?

Depuis la commercialisation du premier Arduino, des concurrents sont apparus. Dans la section « Pour aller plus loin » page 321, je vais en comparer certains, mais pour cette expérience, je choisis un Arduino pour plusieurs raisons :

- Les cartes Arduino sont très populaires.
- En raison de leur grand nombre d'utilisateurs, une quantité importante de bibliothèques de code sont disponibles. Même si vous ne voulez pas utiliser ces sources telles quelles, vous pourrez adapter certaines routines à vos propres besoins.
- Du fait que les cartes Arduino de base manquent de certaines fonctions sophistiquées, leur apprentissage est plus facile.
- Les cartes d'entrée de gamme sont parvenues à un niveau de développement stable, elles sont devenues un standard, comme les puces logiques de la série 74xx, cinquante ans après leur introduction. Je pense que l'on utilisera toujours les cartes Arduino durant de nombreuses années à venir.

Technique : concepts de base

Habituellement, je vais directement aux expériences pratiques, mais pour cette expérience, vous devez préalablement connaître une certaine terminologie.

La liste des instructions que l'on écrit pour un microcontrôleur a été appelée ***sketch*** par les concepteurs du système Arduino (mot anglais, bien que le logiciel ait été francisé). Peut-être pensaient-ils que le mot programme était trop technique. Le terme « sketch » signifie croquis en français. C'est en réalité un programme : si vous cherchez sur Internet, vous trouverez des gens qui utilisent le mot programme aussi souvent que le mot sketch.

Vous devez écrire le programme sur un ordinateur en utilisant un logiciel appelé ***EDI***, signifiant ***Environment de Développement Intégré*** (*IDE*, pour *Integrated Development Environment* en anglais). Considérez qu'il s'agit d'un simple éditeur de texte, spécialisé dans le traitement du langage de programmation.

Pour obtenir l'EDI, vous devez le télécharger, puis l'installer comme tout autre logiciel. Après l'avoir utilisé pour écrire un programme, vous pouvez lui demander de vous indiquer si vous avez fait des erreurs. Vous pourrez ensuite lui demander de ***compiler*** le programme. C'est une procédure rapide qui convertit vos instructions en langage machine que le microcontrôleur peut comprendre.

Finalement, vous demanderez à l'EDI d'envoyer votre programme au microcontrôleur par l'intermédiaire d'un câble USB, vous pourrez alors vérifier si le programme fait ce que vous attendez de lui. Tous les environnements de

développement ne fonctionnent pas de cette façon. Certains langages ne nécessitent pas de compilation, si le microcontrôleur contient une couche logicielle que l'on appelle *interpréteur*, qui peut convertir immédiatement les instructions du programme en langage machine. Sachez toutefois que le langage C Arduino nécessite une compilation.

Quelle carte choisir ?

La figure 29-2 montre la photo d'une carte Arduino Uno sur laquelle sont indiquées certaines de ses fonctions. Les rangées de connecteurs d'entrée et de sortie appelés *headers* relient la carte aux broches du microcontrôleur. Vous pouvez y insérer des fils pour relier le microcontrôleur au monde extérieur.

La carte de la figure 29-2 contient un microcontrôleur ATmega de type traversant inséré dans un support. Vous pouvez aussi vous procurer une autre version de la carte Uno, dans laquelle le circuit intégré est un composant monté en surface non remplaçable. Elle est légèrement moins coûteuse, mais je vous conseille de l'éviter, car un microcontrôleur monté sur un support vous permet de l'extraire de la carte pour l'utiliser directement dans un montage, après l'avoir programmé. Ce n'est pas une procédure aussi simple qu'elle ne paraît, mais ça peut être fait.

La carte Arduino Nano est une alternative à la carte Uno, presque identique au niveau de ses fonctions, mais ses composants ont été placés sur une plaque miniature au format DIP à 30 broches. L'avantage de l'Arduino Nano est de pouvoir s'intégrer directement dans une plaque de montage comme tout circuit intégré. Certaines personnes lui reprochent de ne pas pouvoir être utilisé avec des *cartes d'interface* (*shields*). C'est un point que je dois vous expliquer afin que vous puissiez décider de votre achat en toute connaissance de cause.

Une carte d'interface est une plaque additionnelle qui se place au-dessus d'un Arduino Uno (ou similaire), et se relie à ses connecteurs latéraux. Une carte d'interface peut ressembler à une plaque de montage miniature vous permettant d'y insérer d'autres composants, mais la plupart des cartes d'interface sont des circuits imprimés pré-équipés de composants, remplissant une fonction spécifique.

Comme la carte graphique d'un ordinateur, ce type de carte interface est une carte fille. Elle apporte des fonctionnalités matérielles supplémentaires pouvant être pilotées par l'Arduino en-dessous. Certaines cartes d'interface sont conçues pour être empilées les unes sur les autres, comme celles sur la figure 29-4, qui sont prévues pour piloter un petit robot.

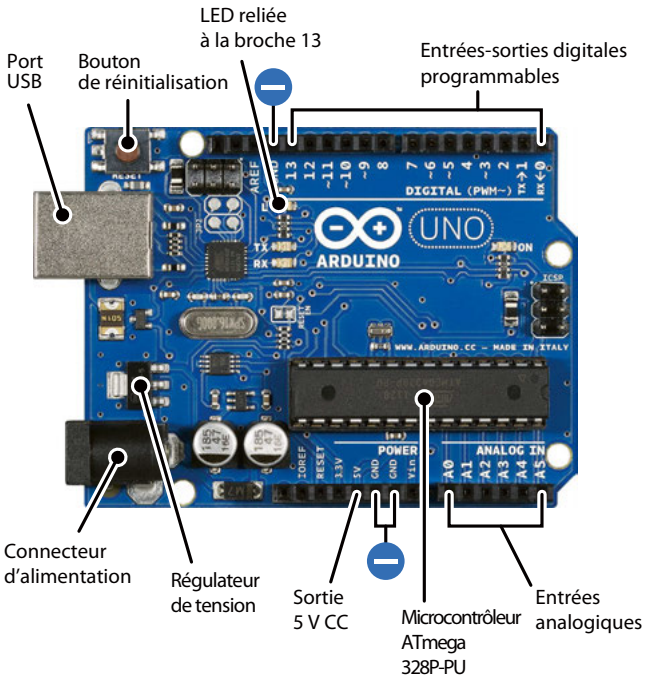


Figure 29-2. *Carte Arduino Uno équipée du microcontrôleur ATmega série fabriqué par Atmel.*

Il existe des centaines de cartes d'interface, commercialisées par de nombreux fournisseurs. Vous pouvez maintenant mieux comprendre comment l'Arduino a évolué. Il était initialement commercialisé à l'attention des amateurs souhaitant écrire quelques lignes de code. Le code pouvait, par exemple, demander à l'Arduino de réagir à l'information issue d'un phototransistor, en allumant des éclairages de sécurité à la nuit tombée, ou de contrôler la température d'une serre agricole en surveillant la température mesurée par une thermistance.

Les bibliothèques de codes sont devenues disponibles, vous n'aviez alors plus besoin d'écrire personnellement beaucoup de logiciels. Enfin les cartes d'interface ont été développées, vous évitant de créer votre propre montage.

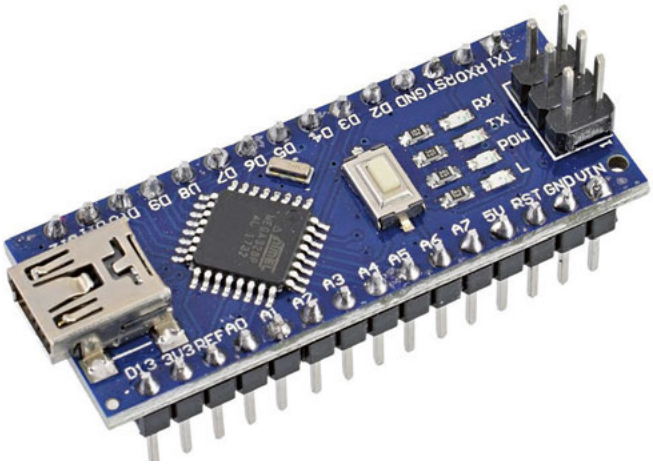


Figure 29-3. *Carte Arduino Nano, compatible avec les plaques de montage.*

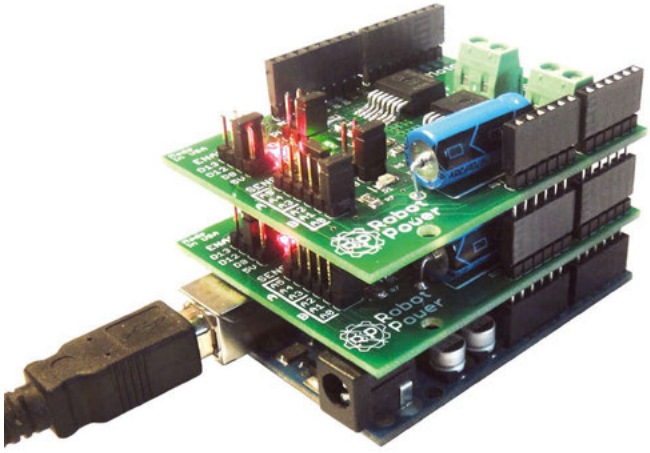


Figure 29-4. *Empilage de cartes interfaces sur un Arduino Uno.*

Cette orientation semble être en contradiction avec l'esprit du mouvement des «*makers*», mais cela ne me dérange pas. Certaines personnes souhaitent avoir un moyen de réaliser rapidement un produit fini ; d'autres préfèrent tout réaliser eux-mêmes. Je suis heureux qu'il y ait une solution pour chacun. La seule chose qui me préoccupe est d'être sûr que vous compreniez toutes les options disponibles avant d'acheter une carte Arduino. La comparaison est la suivante :

- La carte Uno peut être achetée avec un microcontrôleur enfiché sur un support, qui lui permet d'être transplanté par la suite.
- La carte Uno est compatible avec des cartes d'interfaces qui lui apporteront des fonctionnalités supplémentaires.
- La carte Nano convient au développement sur une plaque de montage, de la même façon que les circuits intégrés décrits dans ce livre.
- Un programme écrit pour une carte Uno, fonctionnera également sur une carte Nano.

Ici, je vais utiliser une carte Uno, car elle est plus répandue que le Nano, et vous souhaiterez sans doute la compléter par des cartes d'interface dans le futur. Les petits programmes que je vais vous montrer seront compatibles avec une carte Uno, aussi bien qu'avec une carte Nano.

J'ai maintenant terminé mes explications. Sommes-nous prêts à commencer

Presque. J'ai horreur de devoir prolonger cette introduction, mais il y a encore un point à aborder : pouvez-vous acheter un clone ?

Attention aux imitations

L'Arduino est *open source*, c'est-à-dire que la société qui l'a créé a décidé de ne pas contrôler ni protéger sa propriété intellectuelle, car beaucoup de personnes dans le monde informatique pensent que le partage des informations encourage l'innovation.

Malheureusement cela permet à quiconque de fabriquer des « cartes Arduino » pour lesquelles l'acheteur n'a aucun recours si leur fonctionnement n'est pas totalement identique.

Des fournisseurs tels que Mouser, Digikey, Maker Shed, Sparkfun et Adafruit vendent tous des versions Arduino originales. Sur d'autres sites, vous pourrez trouver des *copies non certifiées* de cartes Arduino pour un coût inférieur, parfois présentées comme *clones*. Ces imitations ne devraient pas utiliser le logo de la marque, qui demeure sous contrôle d'Arduino.

Figure 29-5. *Seules les cartes fabriquées ou sous licence Arduino comportent ce logo imprimé.*

Pour vous aider à distinguer les cartes originales des imitations, vous pouvez rechercher la présence du logo de la figure 29-5.

Les cartes qui ne sont pas fabriquées sous licence Arduino sont néanmoins parfaitement légales et sans doute fiables, mais personnellement, j'ai acquis une carte Arduino d'origine, car j'apprécie le support du fabricant, espérant que de nouveaux produits seront développés.

Venons-en maintenant à la mise en œuvre.

Vous aurez besoin de :

- 1 carte Arduino Uno, munie de préférence d'un circuit intégré sur support, et non d'un composant monté en surface
- en option, un Arduino Nano au lieu d'une carte Arduino Uno
- 1 câble USB munis de connecteurs de type A et de type B à ses extrémités
- en option, un câble USB muni d'un connecteur de type A et d'un connecteur mini-USB à ses extrémités, si vous utilisez un Arduino Nano – Attention : ce câble doit permettre les transferts de données, un câble de recharge de smartphone ne conviendra pas
- 1 ordinateur de bureau ou portable avec un port USB, et environ 100 MO d'espace disque disponible
- 1 LED générique
- 1 résistance de 470 ohms

Figure 29-6. *Ce type de câble USB vous permettra de relier votre carte Arduino au port USB de votre ordinateur.*

Mise en œuvre

Les cartes Arduino ne sont pas fournies avec le câble USB nécessaire, vous devez vous en procurer un. Pour une carte Arduino Uno, le type de câble nécessaire est représenté sur la figure 29-6. Ce câble est souvent utilisé comme câble d'imprimante, il est facile de se le procurer.

L'Arduino Nano nécessite un câble muni d'un connecteur mini-USB et capable de transmettre des données. Un câble de recharge de smartphone ne conviendrait pas.

Après avoir acquis le câble, il vous faut le logiciel IDE Arduino pour pouvoir écrire des programmes. Deux alternatives vous sont proposées : vous pouvez télécharger et installer l'IDE sur votre ordinateur, ou utiliser la version « *cloud* » qu'Arduino met à disposition en ligne. Personnellement, je n'ai pas envie de fournir ma date de naissance et mon adresse e-mail pour pouvoir utiliser la version en ligne, j'ai donc téléchargé mon exemplaire de l'IDE.

Quelle que soit l'alternative choisie, vous la trouverez à l'adresse :

www.arduino.cc/

Lorsque vous lirez ces lignes, Arduino pourrait avoir modifié ses pages web, mais je pense que vous pourrez facilement trouver la page de téléchargement de l'IDE.

Si vous utilisez le système d'exploitation Windows, Arduino indique que le logiciel est supporté par Windows 7 et ses versions ultérieures, mais je n'en suis pas totalement persuadé. En installant l'IDE sous Windows 7 sur un ordinateur Dell, j'ai reçu quelques messages d'erreurs et l'installation a échoué, la carte ne pouvait pas fonctionner. Je ne peux pas généraliser à partir d'une expérience malheureuse, mais je pense qu'il est préférable d'utiliser l'IDE avec les versions actuelles de votre système d'exploitation. (Il existe des versions pour Windows, Mac ou Linux.)

```
void setup() {
  // put your setup code here, to run once:

}

void loop() {
  // put your main code here, to run repeatedly:

}
```

Figure 29-7. *Fenêtre de programmation fournie par Arduino à l'ouverture de l'IDE.*

Après avoir téléchargé la version adéquate du programme d'installation de l'IDE, double-cliquez sur son icône et suivez les instructions affichées. Si vous n'êtes pas sûr, vous pouvez trouver la procédure d'installation à l'aide d'un moteur de recherche. Les termes de recherche suivants peuvent être utilisés :

`«Installation arduino Windows»,`

`«Installation arduino Mac»,`

`«Installation arduino Linux».`

Si vous les préférez aux textes certains liens vers des vidéos sont proposés. Ne connectez pas votre Arduino durant l'installation de l'IDE.

Après avoir installé l'IDE, vous pouvez relier votre Arduino à l'aide du câble USB. La carte sera auto-alimentée par la liaison USB, vous n'avez pas besoin d'une autre source d'alimentation pour l'instant. Une LED miniature verte devrait alors s'allumer sur la carte, et une LED jaune devrait clignoter, indiquant qu'un transfert de données se produit.

L'installation de l'IDE devrait avoir placé une icône du logiciel sur votre ordinateur. Double-cliquez sur cette icone, l'IDE devrait alors apparaître, en affichant une fenêtre par défaut correspondant à la figure 29-7.

Une nouvelle version de l'IDE est en cours de développement, elle pourrait apparaître différemment, mais le principe reste le même.

Un menu d'options est situé en-haut de la fenêtre principale de l'IDE.

Si la fenêtre n'affiche pas les textes en français, choisissez **File**, puis **Preferences** et modifiez l'**Editor language** à **French**, puis validez par le bouton **OK,** et redémarrez l'IDE, afin de bénéficier de la modification, les textes devraient maintenant être en français.

L'IDE doit connaitre le type de carte Arduino que vous utilisez, dans le cas contraire, vous ne pourrez pas y copier votre programme.

Choisissez l'option **Outils**, puis **Type de carte**, vous devriez trouver le type de carte Arduino Uno que vous utilisez (ou Nano le cas échéant). Il peut être nécessaire d'ouvrir un sous-menu pour choisir cette option.

Dans le menu **Outils**, vérifiez que le mot arduino est présent en face du sous-menu **Port**. La notion de port de communication date de l'origine du système MS-DOS, mais ce concept existe toujours dans les couches du système d'exploitation Windows. Si vous ne voyez pas le mot **arduino** affecté à un port, ouvrez le sous-menu et vérifiez si **arduino** est assigné à un autre port. En ce cas, choisissez ce port en cliquant sur son nom.

Si l'IDE n'a pas pu communiquer avec votre microcontrôleur, ne pouvant vous aider davantage, je vous conseille de rechercher en ligne avec les termes : « Port arduino non détecté » afin de trouver de l'aide.

Test du clignotement

Vous voici maintenant prêt à fournir des instructions à votre Arduino. Dans la fenêtre par défaut de la figure 29-7, vous verrez :

`Void setup() {`

C'est une ligne de code que le compilateur et le microcontrôleur vont comprendre, elle doit se trouver au début de tout programme Arduino.

Le mot `void` indique au compilateur que cette procédure ne retournera aucun résultat ou valeur numérique.

Le terme `setup()` est le nom de la procédure d'initialisation, qui doit être exécutée une seule fois au début du programme. Notez la présence d'un symbole `{`, immédiatement après `setup()`, et d'un symbole `}` un peu plus vers le bas de la fenêtre.

- Toute procédure Arduino doit être située entre un symbole de début `{` et un symbole de fin `}`.
- Les symboles { et } sont des *crochets* encadrant les instructions d'un programme.

Le crochet de fermeture est situé après une série d'espaces, mais le compilateur ignore tout espace et retour à la ligne durant son fonctionnement.

La ligne

```
// put your setup code here, to run once.
```

est un *commentaire*, qui informe sur ce qui se passe. Le compilateur ignore les lignes commençant par //.

Avant d'écrire un nouveau programme dans la fenêtre par défaut, je vous conseille d'ouvrir le menu **Fichier**, puis le sous-menu **Préférences,** et cocher la ligne **Afficher les numéros de ligne**, car je ferai référence aux numéros de ligne dans les exemples qui suivent.

Dans la fenêtre de l'éditeur, vous pouvez supprimer les lignes de commentaires (mais pas les autres instructions, ni les crochets). Entrez le programme de la figure 29-8.

Si vous êtes déjà familiarisé avec l'Arduino, vous allez dire « oh non, c'est encore ce bon vieux test du clignotement ! ». En effet, c'est pourquoi cette partie est ainsi nommée. C'est un programme que tout le monde utilise comme premier exercice, j'ai simplement modifié les valeurs des délais. Nous ferons un projet plus intéressant très rapidement.

Notez que la police de caractères Consola que j'utilise pour ce programme affiche le chiffe 0 barré, afin de ne pas le confondre avec la lettre O.

Pour modifier la police affichée, procédez ainsi :

Choisissez le menu **Fichier**, puis **Préférences**, cliquez sur le fichier **preference.txt** en bas de la fenêtre pour accéder à son emplacement et pouvoir l'ouvrir dans un éditeur de textes.

Fermez en suite la fenêtre **Préférences** de l'IDE, puis fermez l'IDE **avant** de modifier le fichier **preferences.txt**.

Modifiez la ligne :

```
editor.font=Monospaced,plain,12
```

par

```
editor.font=Consolas,plain,15
```

puis enregistrez le fichier.

Redémarrez l'IDE, les zéros devraient maintenant être barrés, les lettres « l » et les chiffres « 1 » seront également mieux différenciés.

Durant la saisie du programme, l'éditeur vous aidera, en détectant les erreurs. Le terme `pinMode`, est un *mot réservé* pour Arduino, car il a une signification particulière. Tous les mots réservés sont *sensibles à la casse*, c'est-à-dire que pinmode et PinMode ne sont pas identiques à `pinMode` et ne pourront pas être interprétés correctement par le compilateur. Quand une commande est correctement orthographiée, l'IDE l'affiche en rouge orangé. Si vous ne la saisissez pas correctement, elle sera affichée en noir.

Le mot `OUTPUT` est également important. S'il est correctement saisi, il sera affiché en bleu ciel.

Un point-virgule indique la fin d'une d'instruction.

> *Un point-virgule doit être placé à la fin de chaque instruction. Ne l'oubliez jamais !*

Vous devez appuyer sur la touche entrée après la saisie de chaque ligne d'instruction, afin de commencer une nouvelle ligne.

Votre programme ne sera pas forcément formatté comme le mien, mais vous devriez facilement le formater en utilisant le menu **Outils** puis le sous-menu **Formatage automatique**.

```
1 void setup() {
2   pinMode(13, OUTPUT);
3 }
4
5 void loop() {
6   digitalWrite(13, HIGH);
7   delay(1000);
8   digitalWrite(13, LOW);
9   delay(100);
10 }
```

Figure 29-8. *Le bon vieux test « Blink » : premier pas vers la programmation Arduino.*

Comme je l'ai dit précédemment, le compilateur ignorera les espaces excédentaires, les indentations sont utiles car elles indiquent la structuration du programme.

Voyons maintenant la signification des instructions du programme.

L'instruction `loop()`, figurant à la ligne 5 est le nom d'une procédure qui suit `setup()`. Dès qu'un programme est chargé dans l'Arduino, elle sera exécutée automatiquement, après que la procédure d'initialisation `setup()` a été exécutée, et ceci de façon répétitive, jusqu'à ce que l'alimentation de l'Arduino soit interrompue.

Sur la ligne 6, `digitalWrite` est une instruction qui modifie la sortie d'une broche. Quelle broche ? J'ai écrit 13. Si vous revenez à la figure 29-2, vous verrez que des petits nombres blancs sont imprimés le long des connecteurs noirs en haut de la photo. Les entrées-sorties programmables sont numérotées de 0 à 13, j'ai choisi la broche 13, située à droite de la broche de masse **GND**.

La broche **GND** peut être utilisée en association avec les broches numériques. Un programme peut indiquer au microcontrôleur de mettre une broche à l'état `HAUT`, c'est-à-dire fournir une tension positive. Le courant pourra passer de la broche de sortie, au travers d'un composant comme un LED, pour rejoindre la broche **GND**.

Mon programme indique ensuite au microcontrôleur d'attendre sans rien faire. Combien de temps ? `1000` signifie 1 000 millisecondes, il y a 1 000 millisecondes dans une seconde, l'Arduino attendra donc une seconde. Durant ce délai, la broche 13 restera au niveau `HAUT`.

Je pense que, maintenant, vous pouvez comprendre la signification des lignes 8 et 9. Vous voici prêt pour l'étape suivante.

Vérification et compilation

Choisissez le menu **Croquis**, puis le sous-menu **Vérifier/compiler**. L'IDE analyse votre code, et s'il trouve un problème, il vous le signalera dans la zone noire, en bas de la fenêtre de l'IDE. Il vous est possible d'agrandir la fenêtre de chaque côté et l'étirer vers le haut à l'aide de votre souris.

Supposons que vous ayez commis une erreur en entrant DigitalWrite au lieu de `digitalWrite`. Quand vous demanderez une compilation du programme, un message indiquant une `erreur` en ligne `6:3`, c'est-à-dire à partir du troisième caractère de la ligne 6, les deux premiers caractères étant des espaces si vous avez utilisé le formatage automatique.

Vous devez corriger le contenu de votre programme jusqu'à compiler et vérifier sans erreur.

Téléversement et exécution

Choisissez le menu **Croquis**, puis le sous-menu **Téléverser,** pour demander à l'IDE de transférer le programme dans l'Arduino.

Si le téléversement s'effectue correctement, un message le confirmant sera affiché au-dessus de la fenêtre noire d'affichage des erreurs.

Observez maintenant le carte Arduino, votre programme fonctionne déjà, faisant clignoter la LED jaune allumée pendant une seconde, éteinte pendant un dixième de seconde, selon les instructions de votre programme. La LED jaune est en effet reliée en parallèle avec la broche 13.

Vous allez maintenant devoir relier une plaque de montage à votre carte UNO, faites-le comme sur la figure 29-9. C'est un cas où les fils de liaison munis d'un petit connecteur à chaque extrémité sont utiles, mais des fils de tests seront également adaptés. Une connexion part de la broche 13 du connecteur de la carte Arduino, traverse une LED en série avec une résistance qui retourne à la broche **GND** de la carte. Votre LED clignote maintenant de façon synchrone avec la LED de la carte Arduino.

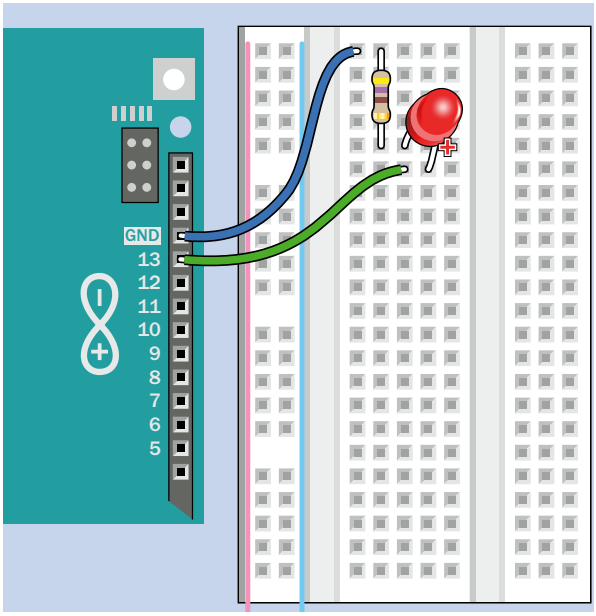


Figure 29-9. *Reliez la carte Arduino à une plaque de montage.*

Cela est certes peu, après tant d'étapes préalables, mais il faut commencer ainsi, le clignotement d'une LED est le point de départ habituel de la programmation d'un microcontrôleur. Cela vous permet également d'essayer la modification des paramètres. Dans la fenêtre IDE, changez la valeur du premier délai, ligne 7 :

```
delay(100);
```

La vitesse de la LED ne change pas immédiatement, car vous devez d'abord compiler, puis téléverser le programme modifié dans la carte Arduino. (En fait, si vous choisissez directement la commande **Téléverser**, la compilation aura lieu automatiquement).

La LED est maintenant allumée pendant seulement un dixième de seconde. Vous voyez qu'après avoir pris la peine d'écrire un programme, le modifier est très facile. Si vous aviez utilisé un temporisateur 555 pour faire la même chose, vous auriez dû remplacer les résistances et les condensateurs après avoir recherché la durée dans les tableaux.

Voici un résumé de ce que vous venez d'apprendre et ce que vous devez faire pour programmer un Arduino :

- Commencez, si nécessaire, un **nouveau** programme (croquis) à l'aide du menu **Fichier**.
- Chaque programme doit commencer par une fonction setup qui sera exécutée une seule fois.
- Déclarer le numéro de la broche digitale et son mode de fonctionnement par l'instruction `pinMode`.
- Le mode d'utilisation d'une broche digitale peut être `INPUT` (entrée) ou `OUTPUT` (sortie).
- Certains numéros de broches ne sont pas valides. Examinez votre carte Arduino pour connaître les numéros inscrits.
- Une paire de crochets est utilisée pour encadrer les instructions d'une procédure du programme. Les instructions peuvent se situer sur des lignes différentes car le compilateur ignore les espaces et les fins de lignes.
- Chaque instruction doit se terminer par un point-virgule.
- Chaque programme Arduino doit contenir une fonction `loop` qui s'exécutera indéfiniment.
- La commande `digitalWrite` permet de définir l'état `HAUT` ou `BAS` d'une broche de sortie.
- `delay` provoque l'inactivité du microcontrôleur pendant la durée spécifiée en millisecondes.
- Les valeurs entre parenthèses après le nom d'une instruction sont ses *paramètres*, qui indiquent au microcontrôleur la façon dont l'instruction doit se comporter.
- Utilisez le sous-menu **Vérifier/Compiler** du menu **Croquis** pour vérifier votre programme avant de le téléverser dans l'Arduino.
- Toutes les erreurs détectées durant l'opération de **vérification/compilation** doivent être corrigées.
- Les mots réservés constituent le vocabulaire des commandes compréhensibles par le microcontrôleur Arduino. Les majuscules et les minuscules doivent être respectées.
- Après avoir été téléversé, votre programme sera exécuté automatiquement et continuera ainsi jusqu'à ce que l'alimentation du microcontrôleur soit interrompue, ou qu'un nouveau programme soit téléversé.
- Il y a un bouton de réinitialisation, situé près du connecteur USB de la carte Arduino. Quand il est activé, l'Arduino redémarre l'exécution du programme depuis le début.

Attention à la perte de code

Si vous modifiez, puis téléversez votre programme dans le microcontrôleur, l'ancienne version sera remplacée par la nouvelle. En d'autres termes, l'ancienne version présente dans le microcontrôleur sera effacée. Si vous n'avez pas enregistré votre programme sous un nom différent sur votre ordinateur, il sera définitivement perdu. Soyez prudent quand vous téléversez un programme modifié.

La sauvegarde de chaque version sous un autre nom sur votre ordinateur est une sage précaution. Rappelez-vous :

> *Après avoir été téléversées dans le microcontrôleur, les instructions de votre programme ne peuvent pas être relues.*

L'IDE sauvegarde automatiquement votre programme en lui donnant un nom comportant la date de son écriture. Vous pouvez bien entendu utiliser le sous-menu **Enregistrer sous** du menu **Fichier** et définir le nom que vous préférez. Les espaces ne sont pas acceptés dans les noms des programmes créés pour un Arduino.

Alimentation et mémorisation

Vous vous demandez sûrement ce qu'il advient de votre programme quand vous déconnectez l'Arduino de votre ordinateur.

- Le microcontrôleur doit être alimenté pour pouvoir exécuter votre programme.
- Le microcontrôleur n'a pas besoin d'être alimenté pour conserver votre programme en mémoire. Il fonctionne comme une clé flash USB.
- Si vous souhaitez exécuter votre programme quand la carte Arduino n'est plus reliée à votre ordinateur, vous devez l'alimenter par le connecteur cylindrique noir situé près du connecteur USB de la carte.
- La tension d'alimentation doit être comprise entre 7 V CC et 12 V CC, il n'est pas nécessaire qu'elle soit stabilisée, car la carte Arduino est équipée d'un régulateur de tension LM7805, identique à celui que vous avez précédemment utilisé. Le régulateur change la tension d'entrée fournie en 5 V CC pour le microcontrôleur. (Certaines cartes Arduino utilisent une tension de 3,3 V, mais ce n'est pas le cas de la carte Uno.)
- Le connecteur d'alimentation est une prise jack de 2,1 mm de diamètre avec le pôle positif au centre. Vous pouvez acquérir un adaptateur secteur de 9 V muni d'une telle fiche.
- Si vous reliez une alimentation externe à la carte Arduino alors qu'elle est reliée à votre ordinateur par un câble USB, l'Arduino utilisera automatiquement l'alimentation externe.
- Vous pouvez déconnecter votre carte Arduino du port USB de votre ordinateur sans utiliser l'option « Retirer le périphérique en toute sécurité… » de Windows.

En ce qui concerne la mémoire de la carte : les puces ATmega utilisent le même type de mémoire réinscriptible non volatile que l'on trouve dans les disques solides. Bien que très fiable, il existe une certaine incertitude sur leur durabilité. ATmel la garantit pour 10 000 cycles d'écriture avec verrouillage automatique des zones de mémoire devenant défectueuses.

Cela serait largement suffisant pour la mémoire d'une clé USB, d'un smartphone ou d'un appareil photo, mais un microcontrôleur fait davantage usage de certaines zones de la mémoire. Cela dépend du type d'application et de la fréquence d'utilisation de la puce, mais c'est indéniable, un microcontrôleur n'a pas la fiabilité élevée d'une puce logique conventionnelle. Est-ce important ? Je ne pense pas, mais vous devez le savoir.

Problèmes Uno et Nano

Tout comme l'Arduino Uno, l'Arduino Nano peut être alimenté par le câble USB, mais il ne possède pas de connecteur d'alimentation externe. Si vous devez utiliser une carte Nano en la déconnectant de votre ordinateur, vous devrez l'alimenter par une source d'alimentation non régulée comprise entre 6 V CC et 20 V CC reliée à la broche 30 (identifiée **Vin**), ou par une alimentation régulée de 5 V CC reliée à la broche 27 (identifiée **5V**).

Que se passera-t-il si vous faites une erreur ? Si vous reliez accidentellement la broche 27 à une tension plus élevée, vous risquez d'endommager la puce. Si vous appliquez une tension de 5 V à la broche 30, il ne se passera rien. C'est pourquoi, il est recommandé d'utiliser une alimentation régulée de 5 V comme pour l'alimentation des circuits intégrés logiques.

Si vous inversez les pôles de l'alimentation de votre Nano, il sera probablement définitivement endommagé, il en sera de même pour une carte Uno.

Si vous avez acquis la version de la carte Uno munie d'un support pour le microcontrôleur, vous pensez probablement pouvoir programmer le microcontrôleur et l'implanter où vous voulez. Malheureusement, il y a quelques problèmes liés à cette opération. Vous pourrez en prendre connaissance en lisant l'ouvrage *AVR programming* d'Eliott Williams. Si vous souhaitez le faire, vous n'aurez besoin que d'une carte Uno et vous pourrez acheter de nombreuses puces ATmel pour un prix environ dix fois inférieur à celui d'une carte Uno.

Vous pourrez programmer la puce de la carte Uno, et la retirer pour l'utiliser dans un projet autonome. Il vous faudra insérer une autre puce dans la carte Uno, la programmer, et l'utiliser dans un projet différent et ainsi de suite.

Si vous utilisez un Arduino Nano, son microcontrôleur ne peut pas être dissocié. Vous pouvez l'insérer dans une plaque de montage, mais si vous voulez dupliquer votre projet, vous devrez acheter d'autres Arduino Nano ce qui sera bien plus coûteux que l'achat de plusieurs microcontrôleurs ATmel.

Pourquoi ne pas utiliser un Arduino pour tous les projets ?

Maintenant que vous avez expérimenté la mise en œuvre d'un programme et avez appris que l'Arduino pouvait contrôler de nombreux types de matériels, vous pensez peut-être que vous auriez pu économiser beaucoup de temps en utilisant un microcontrôleur dans les projets d'alarme anti-intrusion ou le verrou électronique.

Je ne sais pas si vous auriez gagné du temps, mais vous auriez pu ajouter des fonctionnalités à ces projets. Par exemple, utiliser un code de déverrouillage, constitué d'une suite de nombres aurait été particulièrement facile, et vous auriez également pu afficher un message sur un petit écran LCD.

Cela rend les microcontrôleurs particulièrement attractifs, mais on n'obtient rien sans peine. Vous devez apprendre et comprendre un langage de programmation, après quoi vous devez effectuer les opérations d'écriture et débogage du code. Chaque langage a ses particularités et ses limites, vous les découvrirez rapidement ce qui peut être frustrant. La documentation de programmation n'est pas toujours claire, si vous recherchez des recommandations en ligne, elles ne correspondront pas toujours à ce que vous recherchez, elles pourraient même être incorrectes.

Vous pourriez également découvrir que le microcontrôleur que vous avez choisi ne possède pas toutes les capacités dont vous avez absolument besoin, ce qui vous conduira à utiliser une puce plus puissante du même fabricant. Il vous faudra alors apprendre la nouvelle version du langage de programmation, voire même un langage différent.

Beaucoup de personnes n'hésitent pas à affronter ces difficultés, car les microcontrôleurs offrent une grande quantité de possibilités. En fait, certaines tâches qu'il serait peu pratique ou impossible de réaliser avec des composants conventionnels sont relativement simples avec un microcontrôleur, quand on devient habitué à son langage de programmation. Je vous donne quelques comparaisons ci-après.

Fondamentaux : programmation ou non ?

Avantage des composants discrets :

- Simplicité
- Résultat instantané
- Aucune programmation nécessaire
- Économiques, dans le cas de petits circuits
- Les connaissances acquises seront valides dans le futur
- Meilleurs pour les applications analogiques, comme par exemple l'audio
- Certains sont nécessaires, en complément des microcontrôleurs

Inconvénients des composants discrets :

- Capables de ne réaliser qu'une seule fonction
- La conception des circuits est complexe pour les applications de logique numérique

- Évolution des circuits difficiles. Les grands circuits seront compliqués, voire impossibles à mettre en œuvre
- Les modifications d'un circuit peuvent être difficiles, voire impossibles
- L'utilisation de davantage de composants requiert plus de puissance électrique

Avantages des microcontrôleurs :

- Universels, ils peuvent réaliser de nombreuses fonctions
- Ajouts et évolutions sont en général facilités (réécriture du programme)
- Énorme quantité de bibliothèques d'applications disponibles en ligne
- Idéaux pour la réalisation d'applications mettant en œuvre une logique complexe

Inconvénients des microcontrôleurs :

- Connaissances avancées en programmation nécessaires
- Temps de mise en œuvre important
- Les évolutions technologiques impliquent un apprentissage permanent
- Chaque microcontrôleur a ses propres caractéristiques, qu'il faut connaître et mémoriser
- La complexité importante conduit à un risque accru d'erreurs
- Nécessité de disposer d'un ordinateur et d'un espace de stockage des programmes
- Courant de sortie limité par rapport à un temporisateur 555

Expérience 30
Des dés plus sophistiqués

Je vais maintenant aborder la réalisation d'un programme plus ambitieux, qui va reprendre le projet des dés magiques de l'expérience 23. Au lieu d'utiliser des circuits intégrés logiques, je vais utiliser l'instruction « if » et ses opérateurs, dans le programme d'un microcontrôleur. Je peux ainsi remplacer plusieurs composants matériels par une douzaine de lignes de code, et le microcontrôleur va éviter d'avoir besoin d'utiliser d'autres composants dans le circuit. C'est l'exemple idéal d'une application qui convient. (Il nécessite toutefois des LED et leurs résistances en série.)

Vous aurez besoin de :

- 1 plaque d'essais, des fils de liaison, une pince coupante, une pince à dénuder, des fils de test et un multimètre
- 7 LED génériques
- 7 résistances de protection de 470 Ω
- 1 carte Arduino Uno
- en option, un Arduino Nano en remplacement de la carte Uno
- 1 câble USB muni d'une fiche de type A à l'une de ses extrémités et d'une fiche B à l'autre
- en option, 1 câble USB muni d'un connecteur mini-USB convenant à l'Arduino Nano
- 1 ordinateur de bureau ou portable avec un port USB disponible
- 1 interrupteur tactile

Limites de l'apprentissage par l'expérience

L'apprentissage par l'expérience convient parfaitement à la découverte d'un composant électronique. Vous pouvez le connecter sur une plaque de montage, mettre sous tension

et constater ce qui se passe. Même dans le cas où vous concevez un circuit, il est possible de progresser par essais et corrections successifs.

L'écriture d'un programme est un sujet différent. Si vous commencez sans avoir préalablement défini un plan de mise en œuvre, vous risquez de perdre beaucoup de temps. C'est pourquoi, dans ce projet, je vais vous décrire le processus de planification de votre travail.

Randomisation (générer au hasard)

La question est évidente : « que doit précisément faire le programme d'un dé électronique » ?

Je veux choisir un nombre aléatoire compris entre 1 et 6, et en afficher la représentation à l'aide de LED. Le nombre aléatoire généré par le microcontrôleur est choisi par le joueur en appuyant sur un bouton-poussoir, qui interrompt un comptage rapide, à un instant arbitraire. Est-ce qu'un Arduino peut générer un nombre aléatoire pour moi ?

Pour répondre à une telle question, il faut d'abord consulter le site web Arduino pour trouver la section de référence du langage. Ce n'est pas aussi compréhensible que je le souhaite, mais c'est le point de départ. Vous pouvez la trouver en vous rendant sur le site :

https://www.arduino.cc/reference/fr/

vous y trouverez la rubrique **Nombres aléatoires** décrivant l'utilisation de la fonction `random()`, malheureusement pas encore disponible en français, mais vous pourrez trouver de nombreux sites décrivant les fonctions du langage Arduino en français, comme par exemple :

https://arduino-france.site/fonction-random/

La plupart des langages de programmation de haut niveau possèdent un générateur de nombres au hasard, qui paraissent être aléatoires, bien que le générateur utilise des formules mathématiques. Si j'utilise cette fonction du langage C Arduino, le joueur doit appuyer sur le bouton, l'Arduino choisira un nombre compris entre 1 et 6, mon programme le convertira afin de l'afficher par les LED, ce sera terminé ! Si le joueur décide de relancer les dés une seconde fois, il devra appuyer une autre fois sur le bouton.

Cela paraît séduisant, mais je me demande si c'est correct ? Un nombre qui apparaît de façon aussi rapide pourrait sembler ne pas être totalement aléatoire. Si je reviens au projet précédent dans sa version matérielle, la façon dont il fonctionnait est peut-être intéressante, car il affichait une multitude de combinaisons illisibles que le joueur devait interrompre, comme une machine à sous, au Casino.

Dans la réalité, une machine à sous affiche une séquence qui n'est pas totalement floue. Les symboles apparaissent suffisamment rapidement pour attirer l'attention et permettre d'essayer d'arrêter l'affichage quand apparaît ce que l'on souhaite.

J'aime cette approche, je vais utiliser la fonction `random()` intégrée au langage C Arduino pour choisir un nombre parmi une suite qui semble aléatoire et que le joueur doit stopper.

D'accord, et alors ?

Faudra-t-il un autre bouton pour redémarrer l'affichage rapide des nombres ? Non, ce n'est pas nécessaire : le même bouton pourra le faire. Il suffira de l'enfoncer une première fois pour arrêter l'affichage, et l'appuyer une seconde fois pour le redémarrer.

C'est ce que je souhaite que fasse le microcontrôleur. Il ne me reste plus qu'à imaginer comment.

Pseudocode

Avant d'écrire un programme, j'aime créer un *pseudocode* sous forme d'une suite d'instructions littérales que je peux ensuite facilement convertir dans le langage de programmation. Voici mon pseudocode créé pour le programme des dés sophistiqués. Rappelez-vous que le microcontrôleur traitera ces instructions à très grande vitesse.

Étape 1 : choix d'un nombre aléatoire.

Étape 2 : le convertir en points représentant la valeur du dé et allumer les LED correspondantes.

Étape 3 : vérifier si un bouton a été pressé.

Étape 4 : si aucun bouton n'a été pressé, revenir à l'étape 1, choisir un autre nombre et continuer.

Si un bouton a été activé :

Étape 5 : arrêter la mise à jour de l'affichage.

Étape 6 : attendre que le joueur appuie une seconde fois sur le bouton. Retourner alors à l'étape 1.

Voyez-vous un problème dans cette séquence ? Essayez de l'imaginer selon le point de vue du microcontrôleur. Avez-vous tout ce dont vous avez besoin pour accomplir la tâche ?

Non, en fait il manque certaines instructions. L'étape 2 dit : allumer les LED appropriées, mais il n'y a aucune instruction disant de les éteindre !

- Un ordinateur ne fait *uniquement* que ce qu'on lui dit de faire.

Si je souhaite que les LED allumées soient éteintes avant d'afficher une nouvelle valeur, je dois prévoir une instruction pour le faire.

Où devrait-elle se situer ? Sans doute immédiatement avant qu'une nouvelle valeur soit choisie et affichée. Je vais l'ajouter à une nouvelle étape 0.

Étape 0 : éteindre les LED allumées.

Mais comment le microcontrôleur connaît-il les LED qui sont allumées ? Je devrais stocker ces informations dans sa mémoire. Cela ajouterait de la complexité au programme, je pense qu'il existe une meilleure solution consistant à demander au programme d'éteindre *toutes* les LED en mettant toutes ses sorties au niveau BAS, qu'elles soient préalablement au niveau HAUT ou au niveau BAS.

Le microcontrôleur va consacrer un peu de temps additionnel pour exécuter les instructions éteignant les LED qui sont déjà éteintes. Cela a-t-il de l'importance ?

Au début de l'informatique, quand les processeurs étaient très lents, chaque programmeur devait optimiser ses programmes pour éviter tout délai inutile, même minime. Mais ces temps sont révolus, le moindre microcontrôleur peut se permettre d'utiliser inutilement quelques cycles de traitement. Je vais donc éteindre toutes les LED, indépendamment de leurs états, l'étape 0 sera donc la suivante :

Étape 0 : éteindre toutes les LED.

Entrées des boutons

Y a-t-il autre chose qui soit manquant dans les instructions de mon pseudocode ? Oui, et cela est plus compliqué. Il y a un problème concernant les boutons.

Une fois encore, je dois visualiser ce que je souhaite que le programme fasse, cela demande une certaine imagination. Faisons-le apparaître comme cela :

- L'affichage rapide parcourt les nombres très rapidement.
- Le joueur appuie sur le bouton pour l'arrêter.
- Le joueur relâche le bouton et observe l'affichage.
- Le joueur appuie à nouveau sur le bouton et l'affichage rapide recommence.

Je vois un problème. L'affichage va reprendre si rapidement que le doigt du joueur sera encore sur le bouton, ce qui provoquera à nouveau l'arrêt de l'affichage si le bouton est encore activé.

Donc, quand le joueur appuie à nouveau sur le bouton pour redémarrer l'affichage, je vais attendre qu'il le relâche pour le déclencher. Cela est toutefois peu intuitif. Les gens espèrent que quelque chose se produise quand ils appuient sur un bouton, pas quand ils le relâchent.

D'accord, il suffirait que le joueur sache qu'il doit relâcher le bouton pour recommencer l'affichage !

Je ne pense pas. Un programme ne doit jamais imposer à un utilisateur de faire quelque chose qui ne soit pas naturel. Les programmes sont au service des utilisateurs, pas le contraire !

Vous pensez sans doute que la prise en compte de tant de détails devient un peu laborieux. En ce cas, je dois vous dire que « la programmation est remplie de détails ». C'est ainsi !

Vous pourriez en rester là et chercher un programme de simulation de dés en ligne. Je suis certain que vous en trouveriez des dizaines. Mais vous n'auriez par la satisfaction de l'avoir fait vous-même, et si quelqu'un vous demande par la suite « Avez-vous écrit ce programme ? », il vous faudra avouer que quelqu'un d'autre l'avait écrit.

Dans tous les cas, le problème du bouton n'est pas si ardu. Je pense que j'ai uniquement besoin que l'affichage redémarre, et pendant une seconde ou deux, le programme ne se souciera pas si le joueur appuie encore sur le bouton on non, car il l'ignorera totalement pendant ce délai. Je vais donc avoir besoin que le microcontrôleur décompte deux secondes de la façon suivante :

Avant l'étape 0 : initialiser un temporisateur interne à la valeur zéro, puis le déclencher.

[autres étapes]

Étape 4 : si le bouton est appuyé, ET si le temporisateur a compté les deux secondes, vérifier l'état du bouton.

Il reste cependant encore un problème : le rebond des contacts. Le microcontrôleur est suffisamment sensible et réactif pour interpréter les rebonds comme des appuis multiples sur le bouton.

Le traitement de l'appui sur le bouton s'avère être plus complexe que je ne le pensais. Je vais donc l'isoler dans une courte fonction qui lui sera réservée. Le pseudocode sera la suivant (j'ai utilisé le raccourci **FB** pour différencier les instructions de la fonction du bouton dans le programme principal) :

FB 1. Ignorer le bouton pendant un court instant pendant que ses contacts se stabilisent après un appui.

FB 2. Surveiller le bouton et attendre qu'il soit relâché.

FB 3. Ignorer le bouton pendant un court instant pendant que ses contacts se stabilisent après avoir été relâché.

FB 4. Surveiller le bouton et attendre qu'il soit de nouveau activé.

FB 5. Revenir à la routine principale et redémarrer l'affichage aléatoire.

Je pense que cela va réaliser ce qu'il faut. Une seule question subsiste : le microcontrôleur peut-t-il compter des secondes comme un chronomètre ?

Technique : l'horloge système

Si vous consultez la référence du langage, vous verrez qu'il existe une fonction `millis()` qui comptabilise des millisecondes. Elle part de zéro à chaque démarrage du programme et peut compter jusqu'à un nombre correspondant à environ 50 jours. C'est intéressant, mais l'Arduino ne permet pas à un programme de réinitialiser la valeur de l'horloge à zéro. Elle démarre automatiquement et compte jusqu'à l'arrêt du programme.

Comment s'affranchir de cela ? De la même façon que j'utiliserai la pendule de ma cuisine, quand je veux faire cuire des œufs.

Je regarde d'abord la pendule et note mentalement l'heure à laquelle l'eau commence à bouillir.

J'ajoute à ce temps le nombre de minutes désiré et je retiens le total. Ce sera l'heure de fin de cuisson.

Quand la pendule atteint l'heure de fin de cuisson, je retire les œufs de l'eau.

S'il est 17 h 02, et que je veux cuire les œufs pendant 7 minutes, je me dis mentalement « 17 h 02 plus sept minutes, ça fait 17 h 09, je retiens 17 h 09 et retire les œufs à cette heure précise ».

Pour le faire dans le programme de simulation des dés, il faut utiliser une *variable* dans laquelle sera mémorisé le temps d'arrêt. Une variable est une sorte de boîte identifiée de l'extérieur par une référence, et contenant une valeur. Je peux choisir un nom pour cette référence, je vais prendre `ignore`, car c'est le temps pendant lequel le programme doit ignorer le bouton.

Au démarrage de la boucle `loop()`, je vais dire au programme de regarder la valeur de l'horloge système, je vais y ajouter 2000, c'est-à-dire 2000 millisecondes) et mettre le total dans la variable `ignore`. Ce sera mon objectif limite à atteindre. Le programme continuera à s'exécuter, il continuera à vérifier la valeur de l'horloge système pour vérifier si elle a atteint la valeur limite.

Voici la nouvelle étape 4 :

Étape 4 : si la valeur de l'horloge système atteint la valeur de la variable `ignore`, ET si le bouton est activé, exécuter la fonction de traitement de l'appui du bouton.

Version finale du pseudocode

Ayant en tête toutes ces considérations, voici la nouvelle version, que j'espère définitive, de la suite des évènements :

Initialisation : initialiser la valeur de la variable `ignore` à la valeur de l'horloge plus 2000.

Étape 0 : éteindre toutes les LED.

Étape 1 : choisir un nombre aléatoire.

Étape 2 : convertir ce nombre en motif d'affichage par les LED

Étape 3 : vérifier si le bouton a été activé.

Étape 4 : si le bouton a été appuyé ET si l'horloge système a dépassé la valeur contenue dans la variable `ignore`, exécuter la routine de traitement du bouton, sinon, retourner à l'étape 0.

Routine de traitement du bouton :

FB 1. Attendre pendant un court instant pour que les contacts du bouton se stabilisent après un appui.

FB 2. Surveiller le bouton et attendre qu'il soit relâché.

FB 3. Après que le bouton a été relâché, attendre un court instant pour que ses contacts se stabilisent.

FB 4. Surveiller le bouton et attendre qu'il soit de nouveau activé.

FB 5. Réinitialisation de la variable `ignore` à l'heure courante, plus 2000.

FB 6. Revenir à la routine principale et redémarrer l'affichage aléatoire.

Pensez-vous que cela fonctionne ? Nous allons le vérifier.

Mise en œuvre du matériel

La figure 30-1 montre les sept LED affichant les points d'un dé, implantées sur une plaque de montage. Le principe est identique à celui du montage original, mais cette fois, les LED ne sont plus reliées en série, mais en parallèle car l'Arduino peut fournir davantage de courant qu'une puce logique 74 HCxx. Je n'aurai plus à me soucier d'équilibrer la luminosité des LED.

> *Chaque sortie digitale de l'Arduino Uno (ou Nano) peut fournir 20 mA sans problème. La limite absolue est de 40 mA, mais il est recommandé d'éviter d'atteindre cette limite.*

Quand j'ai testé une LED rouge standard reliée à une résistance de 470 ohms, en série, le courant consommé n'était que de 6 mA, et elle brillait suffisamment. Si une sortie pilote deux LED en parallèle, l'intensité totale sera de 12 mA, ce qui ne posera aucun problème à l'Arduino.

Sur la figure 30-1, vous pouvez observer que la paire de LED gauche-droite sera alimentée par la broche 1 du microcontrôleur, la broche 2 alimentera la LED centrale, la broche 3 les deux LED de deux angles, la broche 4 celles des deux autres angles. Ce sont des choix arbitraires que j'ai fait. Par ailleurs, la broche 0 sera utilisée en entrée reliée au bouton-poussoir et le pôle négatif de l'alimentation sera reliée à la broche GND du microcontrôleur.

Après avoir installé les LED sur la plaque de montage, ne reliez pas encore la masse de l'alimentation à la carte Uno. Il est plus prudent de téléverser d'abord le programme, car l'Arduino pourrait avoir un programme différent déjà chargé, dont on ne connait pas la configuration des broches d'entrées/sorties.

> *Vous devez faire attention à ce qu'un circuit n'applique pas une tension sur une broche numérique configurée en sortie.*

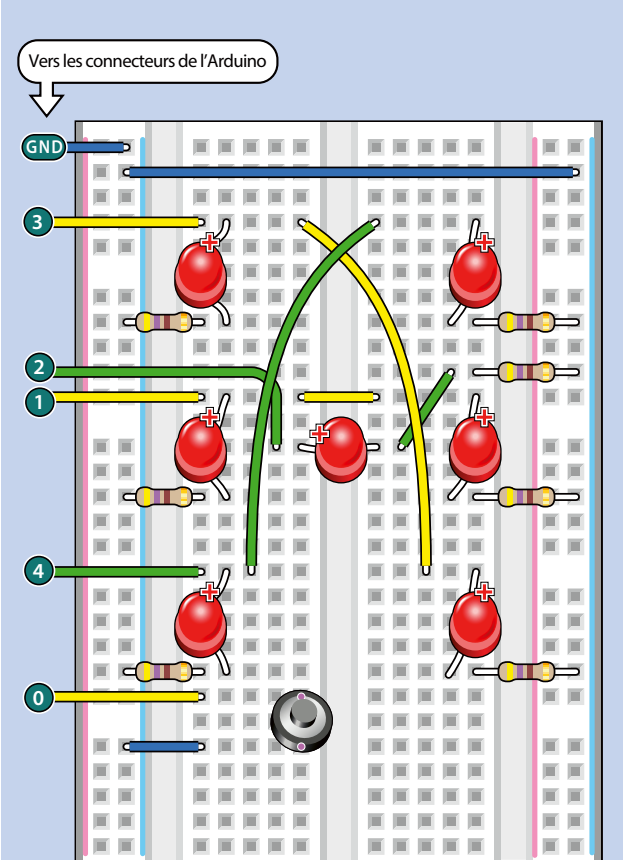


Figure 30-1. *Câblage sur une plaque de montage des sept LED affichant les points d'un dé.*

Dans ce circuit, je n'utilise que les broche 0 à 4. Dès lors, dois-je relier à la masse les broches inutilisées ?

Absolument pas !

- Les broches inutilisées d'un Arduino doivent rester flottantes.
- Si une broche est configurée en sortie, il ne faut jamais la relier à la masse, au risque de l'endommager définitivement.

Le programme

Le programme que j'ai écrit selon le pseudocode est représenté sur la figure 30-2. Il faut d'abord le saisir, puis je vous expliquerai la signification de chaque instruction en langage C de l'Arduino. Il vous faudra évidemment acquérir un manuel explicatif, pour comprendre correctement le langage ; il ne s'agit ici que d'une démonstration qui met en œuvre quelques possibilités.

Notez que sur la ligne 6, il y a un caractère «*underscore*» (que l'on nomme souvent «souligné du huit», ou caractère de soulignement), entre les mots `INPUT` et `PULLUP` ; il s'agit du caractère obtenu par l'appui simultané sur les touches Alt Gr et 8 sur un clavier français.

Sur la ligne 23, il y a deux paires de lignes verticales. Chaque ligne souvent appelée *pipe* en anglais est obtenue en appuyant simultanément sur les touches Alt Gr et 6 sur un clavier français.

Quand vous aurez terminé, choisissez le menu **croquis > Vérifier/Compiler**, afin de voir si vous avez commis des erreurs de saisie.

Le langage C Arduino utilise beaucoup de ponctuations de façon non intuitive. Un crochet en trop (ou manquant) empêchera votre programme de fonctionner. Vous devez examiner chaque ligne de votre code et la comparer minutieusement avec ma liste. Le listing a été créé directement depuis l'IDE Arduino après avoir vérifié son fonctionnement, je suis donc sûr qu'il ne comporte pas d'erreur.

Quand l'opération «**Vérifier/Compiler**» ne trouve plus d'erreur dans votre programme, vous pouvez le «téléverser». Vous pouvez ensuite relier la masse de votre plaque de montage à celle de la carte Arduino Uno, les LED devraient alors clignoter, car l'Arduino commence à exécuter son programme automatiquement. Attendez quelques secondes, puis appuyez sur le bouton-poussoir, l'affichage se fige, montrant une configuration aléatoire du dé. Appuyez à nouveau sur le bouton, l'affichage reprend. Maintenez le bouton appuyé, après deux secondes, le temps de la période «`ignore`», l'affichage se fige à nouveau. Le pseudocode a été programmé avec succès !

```
1 int spots = 0;
2 int outpin = 0;
3 long ignore = 0;
4
5 void setup() {
6   pinMode(0, INPUT_PULLUP);
7   pinMode(1, OUTPUT);
8   pinMode(2, OUTPUT);
9   pinMode(3, OUTPUT);
10  pinMode(4, OUTPUT);
11  ignore = 2000 + millis();
12 }
13
14 void loop() {
15   for (outpin = 1; outpin < 5; outpin++)
16   { digitalWrite (outpin, LOW); }
17
18   spots = random (1, 7);
19
20   if (spots == 6)
21   { digitalWrite (1, HIGH); }
22
23   if (spots == 1 || spots == 3 || spots == 5)
24   { digitalWrite (2, HIGH); }
25
26   if (spots > 3)
27   { digitalWrite (3, HIGH); }
28
29   if (spots > 1)
30   { digitalWrite (4, HIGH); }
31
32   delay (20);
33
34   if (millis() > ignore && digitalRead(0) == LOW)
35   { checkbutton(); }
36 }
37
38 void checkbutton() {
39   delay (50);
40   while (digitalRead(0) == LOW)
41   { }
42   delay (50);
43   while (digitalRead(0) == HIGH)
44   { }
45   ignore = 2000 + millis();
46 }
```

Figure 30-2. *Programme des dés sophistiqués.*

Analyse ligne par ligne

Les trois premières lignes sont les déclarations des variables que j'utilise dans ce programme. Le terme `int` signifie *integer*, c'est-à-dire un nombre entier, ne comportant pas de partie décimale. En langage C Arduino, un entier doit être compris entre `-32768` et `+32767`.

Pourquoi de tels nombres bizarres ? Parce qu'ils sont représentés par des nombres binaires de 16 bits et ces valeurs sont les limites de ces nombres binaires.

À la ligne 1, `points` est le nom d'une variable dans laquelle je vais mémoriser un nombre de 1 à 6, représentant le nombre de points du dé.

À la ligne 2, la variable `brocheSortie` va stocker la valeur de chaque sortie reliée à une ou deux LED. Quand `brocheSortie` vaut 1, le microcontrôleur va changer la valeur de la broche 1, et ainsi de suite.

Le mot *long* signifie « long integer », c'est-à-dire nombre entier long qui est un nombre binaire de 32 bits pouvant stocker une valeur comprise entre `-2 147 483 648` et `2 147 483 647`. Je dois utiliser un entier long pour mémoriser la valeur de l'horloge qui utilise également un entier long, sa valeur pouvant excéder 32 767 millisecondes.

Pourquoi ne pas utiliser un entier long pour toutes les valeurs entières ? Ainsi, je n'aurais plus à me soucier du dépassement des limites pour un entier. C'est vrai, mais un entier long prend deux fois plus de place en mémoire qu'un entier simple et nécessite un temps de traitement double. La capacité mémoire d'une puce ATmel n'est pas très importante.

Si vous vous demandez comment j'ai appris cela, c'est en lisant la référence du langage sur le site web Arduino. Vous devez absolument lire la documentation pour pouvoir écrire vos propres programmes, c'est un sujet que je vais aborder dans le chapitre suivant.

La section `setup()`, qui commence à la ligne 5, indique au microcontrôleur comment chaque broche sera utilisée.

Le mot `PULLUP` indique au microcontrôleur d'utiliser une résistance de tirage pour éviter d'en utiliser une externe avec le bouton-poussoir sur la plaque de montage. L'Arduino possède des résistances de tirage internes, c'est une caractéristique intéressante, par contre il ne possède pas de résistance de rappel. La broche d'entrée sera donc maintenue au niveau HAUT jusqu'à ce que le bouton-poussoir la relie à la masse. Un niveau BAS sur la broche d'entrée indiquera que le bouton est activé.

Après l'initialisation se trouve la boucle principale du programme `loop()` qui se répètera indéfiniment. À la ligne 15, le mot `for` est une instruction de boucle très utile, qui permet au microcontrôleur de parcourir une série de valeurs, en mémorisant chaque valeur dans la variable brocheSortie. La syntaxe est la suivante :

- Le mot réservé `for` indique au microcontrôleur de compter d'une valeur à l'autre selon un pas spécifié.
- Le premier paramètre de l'instruction `for` est la valeur initiale qui est stockée dans la variable `brocheSortie`.
- Le second paramètre indique au microcontrôleur qu'il peut continuer à compter tant qu'il n'atteint pas la limite indiquée par ce paramètre. Le symbole `<` signifie « inférieur à », cette boucle continuera à compter tant que la variable `brocheSortie` est inférieure à 5. En d'autres termes, elle va compter de 1 à 4. Rappelez-vous que j'utilise les broches 1 à 4 pour allumer les LED.
- Le troisième paramètre est *l'incrément*. C'est-à-dire la quantité que la boucle ajoute à la variable `brocheSortie` à chaque itération. Le langage C Arduino me permet de spécifier cela en utilisant le symbole ++, ainsi `brocheSortie++` signifie « ajouter 1 à la variable `brocheSortie` à chaque cycle ».

Une boucle `for` admet toutes sortes de conditions, elle est très souple. Cette boucle compte de 1 à 4, mais elle pourrait facilement compter de 100 à 400, ou jusqu'à n'importe quelle valeur limitée par le type d'entier (`int` ou `long`) de la variable de contrôle.

Après la ligne 15 où le comportement de la boucle est défini, se trouve la procédure commençant à la ligne 16, entre deux crochets, qui indique au microcontrôleur ce qu'il doit faire durant chaque itération de la boucle. Il n'y a qu'une instruction dans cette procédure : mettre au niveau `LOW` (BAS) la broche spécifiée dans la variable `brocheSortie`. Puisque `brocheSortie` va varier de 1 à 4, la boucle `for` va mettre au niveau `LOW` les broches 1 à 4.

Vous devez maintenant comprendre ce qui se passe. La boucle éteint toutes les LED en balayant leurs broches de sortie pour les mettre au niveau `LOW`.

Au lieu d'utiliser une boucle, j'aurais pu utiliser les quatre instructions distinctes suivantes :

```
digitalWrite(1, LOW);

digitalWrite(2, LOW);

digitalWrite(3, LOW);

digitalWrite(4, LOW);
```

mais j'ai préféré vous présenter le concept de boucle **for**, car c'est basique et important. Que se passerait-il si vous deviez éteindre 9 LED ? Ou si vous vouliez que le microcontrôleur fasse clignoter une LED 100 fois ? Une boucle **for** est en général le meilleur moyen de rendre une procédure efficace et performante, quand elle doit se répéter.

Après que la boucle a éteint l'affichage du dé, sur la ligne 18, la fonction **random()** choisit un nombre aléatoire compris entre les limites définies par ses paramètres entre parenthèses. Je veux une valeur de dé comprise entre 1 et 6, mais le langage C Arduino choisira une valeur entre la limite basse et la valeur limite haute moins 1.

Maintenant qu'une valeur aléatoire a été mémorisée dans la variable **points**, le programme doit allumer les LED appropriées. Les instructions **if** vont s'en charger.

Sur la ligne 20, le premier **if** est assez simple. Si la valeur du dé choisie aléatoirement est égale à 6, c'est la seule valeur pour laquelle la broche 1, à laquelle sont reliées les LED gauche et droite du milieu, doit être positionnée au niveau haut.

Le double signe égal (==) est utilisé pour indiquer au programme de faire une comparaison entre deux valeurs. Un signe égal unique (=) est utilisé pour affecter une valeur à une variable comme sur la ligne 18.

Vous vous demandez sans doute pourquoi je n'ai pas demandé au programme d'allumer simultanément les LED des quatre coins, ainsi que le point central, quand la valeur du dé est 6. C'est parce que les points des coins doivent être également allumés pour d'autres valeurs du dé, et il est recommandé de minimiser le nombre de conditions **if**. Vous verrez bientôt comment cela fonctionne.

La condition **if** suivante, à la ligne 23, utilise une double barre verticale **||**, ce qui signifie **OR** (OU) en langage C Arduino. Ainsi, la fonction signifie que si nous avons une valeur du dé égale à 1, OU à 3, OU à 5, il faut allumer la LED du centre, en mettant un niveau **HAUT** sur la broche de sortie 2.

Le troisième if, à la ligne 26, utilise le symbole > qui signifie « supérieur à », afin que, pour toute valeur de dé supérieure à 3, deux points en diagonale bas-gauche – haut-droit soient allumés.

Sur la ligne 29, le programme dit que si la valeur du dé est plus grande que 1, les points de l'autre diagonale doivent être allumés.

Vous pouvez vérifier la logique de ces tests **if** en revenant à la configuration des points du projet des dés magiques, sur la figure 23 10. Les portes logiques avaient été choisies pour correspondre à la sortie binaire du compteur, elles sont donc différentes des opérations logiques de ce programme. Toutefois, la configuration des LED reste identique.

Après les instructions **if**, un délai de 20 millisecondes a été ajouté afin d'éviter que les LED clignotent trop rapidement et paraissent être allumées en permanence. Grâce à ce délai, vous pouvez les voir clignoter, mais encore trop rapidement pour pouvoir les arrêter sur la valeur que vous souhaitez. Vous pouvez néanmoins essayer !

Vous pouvez évidemment modifier le délai à une valeur inférieure ou supérieure à 20 ms.

Examinons maintenant la partie la plus importante : le test AND qui indique au microcontrôleur d'aller exécuter la routine du bouton. En langage C Arduino, les deux éperluettes (&&) sont un ET logique. La ligne 34 peut s'écrire ainsi en langage courant :

SI (**if**) (l'horloge système a dépassé **(>)** la valeur de la variable **ignore**, *ET* (**AND**) l'entrée du bouton broche 0 est au niveau bas), *exécuter* la routine **fonctionBouton().**

Qu'est-ce que « fonctionBouton » ? C'est le nom que j'ai donné à la routine de traitement du bouton. Où est-t-elle ? Je l'ai placée en bas du programme, à partir de la ligne 38, précédée par le mot **void**.

Je n'étais pas obligé de faire ainsi, j'aurai pu l'inclure dans la partie principale du programme, mais créer une section séparée pour chaque procédure est une bonne pratique, car le programme est ainsi plus lisible et facile à comprendre. Cela permettra aux autres personnes de comprendre, il en

est de même pour vous, quand vous reviendrez ultérieurement à la lecture de ce programme, dont vous aurez alors oublié le fonctionnement.

Le concept du langage C isole chaque partie d'un programme en un bloc séparé, le programme y faisant appel quand vous le désirez. Considérez chaque bloc d'instructions comme un serviteur obéissant, qui ne fait qu'une seule chose, comme laver la vaisselle ou sortir la poubelle. Quand vous devez exécuter cette tâche, vous appelez simplement le serviteur par son nom.

Ces blocs sont des *fonctions*, que vous pouvez écrire vous-même. J'ai considéré qu'isoler la routine de traitement du bouton dans une fonction était une manière correcte de structurer ce programme. Je l'ai nommée `fonctionBouton()`, mais j'aurais pu lui donner tout autre nom, à condition que ce nom ne soit pas déjà utilisé par ailleurs.

`Void fonctionBouton()` est l'en-tête de la fonction qui est suivie par la procédure encadrée par des crochets, comme à l'habitude.

Rappelez-vous que l'état de la broche quand le bouton est activé est `LOW`, le niveau `HAUT` survient quand il est relâché, grâce à la résistance de tirage interne. Souvenez-vous également que les LED qui ont été allumées le resteront tant que le microcontrôleur exécute la fonction `fonctionBouton`. Les LED ne seront pas éteintes avant que le microcontrôleur revienne à la boucle `for` de la ligne 16 qui les éteint.

Je peux décrire la fonction de traitement du bouton de la façon suivante :

- Attendre pendant 50 ms que les rebonds des contacts du bouton-poussoir aient cessé, lorsqu'il est activé par le joueur.
- Ensuite, aussi longtemps que le bouton est activé, attendre qu'il soit relâché.
- Attendre à nouveau pendant 50 ms la fin des rebonds des contacts du bouton-poussoir qui a été relâché.

(À ce moment, le joueur regarde la configuration des points affichés et le programme attend que le joueur appuie à nouveau sur le bouton, pour reprendre l'affichage des valeurs aléatoires.)

- Tant que le bouton n'est pas activé, attendre qu'il le soit.
- Réinitialiser la variable `ignore`.

Quand le microcontrôleur atteint la fin de la fonction, où va-t-il ? Il revient immédiatement à l'instruction suivant celle qui a appelé la fonction. Où cela ? À la ligne 36. Le crochet de fermeture sur cette ligne indique au microcontrôleur que c'est la fin de la fonction `loop()`, mais la fonction `loop` se répète indéfiniment, le programme reprend donc à la ligne 14 où se situe le crochet d'ouverture correspondant. Les LED sont éteintes, un nouveau nombre aléatoire est choisi, la fonction `loop` reprend.

La documentation sur le langage C Arduino, disponible sur le site Arduino, n'évoque pas la structuration des programmes, probablement dans le souci de permettre de débuter de la façon la plus simple possible. Arduino vous oblige simplement à utiliser la fonction `setup()` suivie de la fonction `loop()` et vous laisse apprendre le langage par vous-même. La structuration est cependant importante, car quand la taille d'un programme devient importante, il est indispensable de le subdiviser pour éviter qu'il ne devienne un amas d'instructions complexes. Un manuel d'apprentissage du langage C standard vous l'expliquera de façon détaillée.

Il y a un autre avantage à diviser un programme en fonctions. Vous pouvez sauvegarder les fonctions séparément et les réutiliser ultérieurement dans d'autres programmes. La fonction fonctionBouton pourrait être réutilisée dans tout autre jeu qui nécessite l'arrêt d'une action en appuyant sur un bouton, puis redémarre en appuyant une seconde fois sur le bouton.

De même, vous pouvez utiliser les fonctions développées par d'autres personnes dans vos programmes, en vérifiant que l'auteur ne vous interdit pas de le faire par un copyright. Vous en trouverez dans les bibliothèques dont j'ai déjà parlé. Même si je considère qu'il est important que les gens écrivent leurs propres programmes, il n'y a aucune honte à utiliser une fonction qui effectue des opérations répétitives sans intérêt, comme afficher un texte sur un écran LCD. Il existe un principe de base :

- Il est important d'être créatif.

Mais :

- Ne réinventez pas la roue !

Précautions

Après avoir écrit et téléversé votre programme dans la carte Arduino, vous pouvez continuer à l'alimenter par le port USB, ou par sa propre alimentation. Si vous choisissez la deuxième option, il est conseillé de déconnecter le câble USB avant de relier l'alimentation externe. Au cas où vous feriez une erreur, vous pourriez endommager le port USB de votre ordinateur.

Quelques précautions supplémentaires sont à considérer. Rechercher en ligne la phrase suivante : «`comment ne pas griller un arduino`» ou, en anglais «`ten ways to destroy an arduino`».

Vous découvrirez qu'il est plus facile qu'on ne pense de créer du désordre.

Lors de l'utilisation d'une carte Uno avec des LED (ou d'autres composants) sur une plaque de montage, vous devrez connecter tous les composants. La manière conventionnelle est illustrée sur la figure 30-3, en utilisant des fils de pontage munis de petits picots de connexion à leurs extrémités. Vous savez déjà que je ne les apprécie pas beaucoup et voici une autre situation où ils peuvent potentiellement créer des problèmes. Il est trop facile de relier un fil de pontage au mauvais endroit sur la carte Arduino, ce qui pourrait endommager une sortie qui serait reliée à une autre sortie, ce que votre microcontrôleur n'apprécierait pas.

Je crois que si vous décidez d'écrire vos propres programmes, il serait préférable que vous achetiez un Arduino Nano pour l'installer sur une plaque de montage, et l'alimenter en 5 V CC, par l'intermédiaire d'un régulateur LM7805, exactement comme s'il s'agissait de puces logiques. Si vous avez réalisé les circuits munis de puces logiques du chapitre 4, vous savez déjà comment éviter les erreurs de câblage, en utilisant des fils rouges pour le pôle positif de l'alimentation, des fils bleus pour la masse, et toutes les autres couleurs ailleurs.

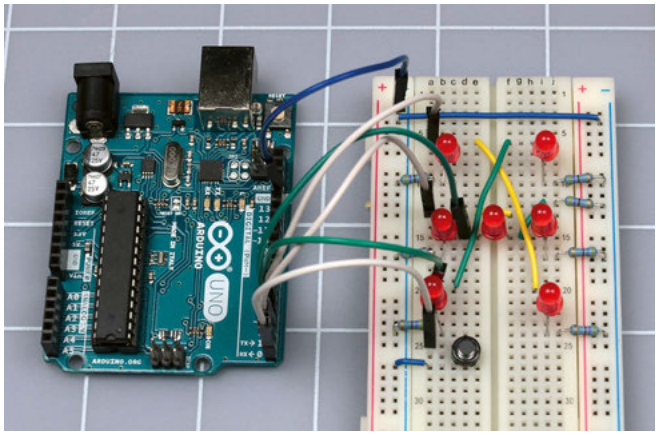


Figure 30-3. *La connexion d'un Arduino Uno à une plaque de montage en utilisant des fils de pontage flexibles est tentante, mais c'est une source d'erreurs.*

Ces bonnes habitudes devraient vous aider à éviter la destruction de vos circuits intégrés.

Ma présentation des cartes Arduino est maintenant terminée.

Si vous souhaitez découvrir quelque chose de différent, comme par exemple un microcontrôleur plus puissant, ou un langage de programmation plus facile à apprendre, je vais aborder ces sujets dans le prochain chapitre qui sera le dernier de ce livre.

Pour aller plus loin

Le langage C n'a jamais été vu comme étant le moyen le plus simple d'apprendre la programmation. Il existe heureusement de nombreuses autres alternatives, je vais vous en suggérer deux dans ce chapitre. La première est un choix évident, alors que l'autre n'est pas du tout évidente, elle pourrait même sembler rébarbative. Vous avez probablement remarqué que je n'hésite pas à être peu conventionnel, quand je pense que quelque chose fonctionne.

Je vais également vous suggérer deux microcontrôleurs autres qu'Arduino. L'un d'eux est un choix délicat, commençons par lui, je terminerai par celui, plus conventionnel qui satisfera chacun.

Historique : revenons au Basic

Le langage de programmation BASIC a été introduit il y a très longtemps, en 1964, dans le but de rendre la programmation plus accessible aux étudiants. À l'origine il comprenait un jeu d'instructions limité, et chaque ligne devait débuter par un numéro de ligne qui devait être saisi manuellement. Les éditeurs de texte plein écran n'existaient pas, le processus d'écriture d'un programme était archaïque comparativement aux moyens actuels.

Le BASIC a néanmoins subsisté, car il était facile à apprendre, et était universel. Bill Gates l'appréciait, Microsoft en a développé une version. Une version améliorée créée pour le PC IBM s'en est suivie, puis en 1985, Microsoft annonçait le QuickBASIC, qui était suffisamment puissant pour certaines applications de gestion. Des concurrents indépendants tel que PowerBASIC ont inclus des possibilités plus évoluées, comme par exemple la programmation des bases de données.

Dans les années 1990, l'adoption généralisée de Windows mit à mal les langages BASIC qui fonctionnaient sous le système MS-DOS. À cette période, le langage BASIC aurait pu disparaitre, mais Microsoft refusait de l'abandonner. Ils ont alors introduit Visual BASIC permettant d'exploiter pleinement les avantages de l'interface graphique de Windows. Il s'ensuivit des versions importantes qui ont permis de maintenir une base d'utilisateurs importante au XXIe siècle.

Aujourd'hui, nombreux sont ceux qui ne savent pas que BASIC existe toujours. Il n'a jamais été à la mode, probablement parce que son nom était stigmatisant. BASIC semblait trop basique ! Son acronyme vient de « *Beginner's All-purpose Symbolic Instruction Code* » (système d'instructions symboliques générales pour débutants). Il a donc été conçu pour les débutants, pourquoi les autres devraient-ils s'en préoccuper ?

Mais les défenseurs du langage ont été obstinés. Ainsi, en 1999, une société anglaise s'appelant Revolution Education a créé son propre BASIC pour plusieurs microcontrôleurs. Leur version incluait des fonctionnalités telles que la modulation en largeur d'impulsion, permettant le pilotage des moteurs à courant continu, le protocole I2C permettant la communication avec d'autres matériels, la conversion analogique-numérique, des commandes spécifiques aux servo-moteurs, et bien entendu, les commandes d'état haut ou bas des broches.

La société Revolution Education nomma ce développement PICaxe, car ils avaient choisi les microcontrôleurs de la série PIC comme plateforme. Mais picaxe signifie pioche en anglais, sans doute pensaient-ils qu'un nom amusant était approprié, ils commercialisaient alors des circuits intégrés modifiés pour l'apprentissage, mais la combinaison PICaxe et BASIC n'a pas suffi à effacer les anciens stigmates. Personnellement, cela ne me choquait pas, je voulais uniquement quelque chose qui fonctionne.

En 2005, j'ai développé un dispositif de refroidissement complexe, pour un laboratoire de recherche californien. J'avais alors besoin d'un microcontrôleur pour son fonctionnement, mais je ne voulais pas le programmer en langage assembleur À cette époque, les possibilités étaient limitées. Les produits Arduino ne convenaient pas, car ils n'avaient pas assez de broches d'entrées/sorties pour les six pompes, les nombreux interrupteurs et boutons-poussoirs, et plus d'une douzaine de capteurs de température et pression qui étaient utilisés. Je savais que mon client voudrait probablement que je puisse modifier le code sur place, pour le faire avec un Arduino, j'aurais dû retirer et réinstaller la puce de la carte de développement.

Dès lors, le système PICaxe répondait à toutes mes exigences. L'un de leurs PIC avait 40 broches et toutes leurs puces avaient un logiciel de lancement préinstallé, aucun matériel additionnel n'était nécessaire. Il suffisait d'installer

le circuit intégré PIC sur un circuit imprimé et d'utiliser un câble USB spécifique pour y transférer le programme, tout était alors prêt.

La société Revolution Education commercialise toujours les produits PICaxe, trois de leurs puces sont représentées sur la figure 31-1. Je dois préciser que je ne suis qu'un de leurs utilisateurs, je n'ai aucun lien commercial ou de tout autre ordre avec cette société ou son personnel.

Mon projet a été un succès, mais mon client m'a demandé tellement d'ajouts que j'ai dû réaliser une version plus conséquente. Ai-je alors pu utiliser des produits PICaxe ? Oui, j'ai dû ajouter une seconde puce munie de 40 broches et de nombreux autres composants. J'ai mis le plan de câblage de la carte sur la figure 31-2, au cas où vous seriez sceptique concernant l'utilisation de BASIC sur un microcontrôleur PIC pour des applications professionnelles. Vous remarquerez qu'il y a plus de 50 connecteurs d'entrées/sorties à gauche de la carte.

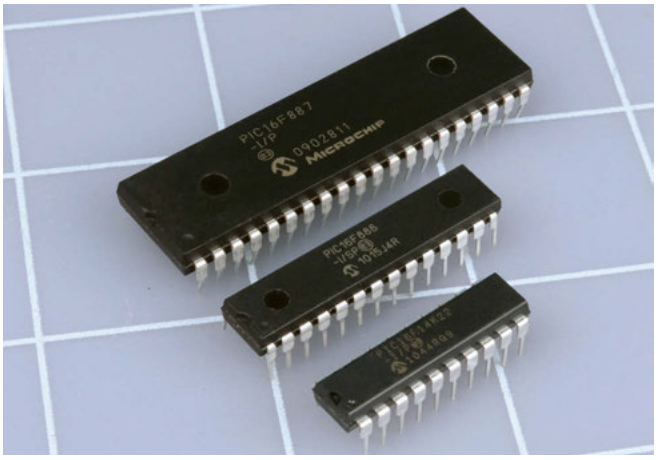


Figure 31-1. *Ces microcontrôleurs munis du programme de lancement préinstallé peuvent être programmés sans autre composant qu'un câble USB spécifique.*

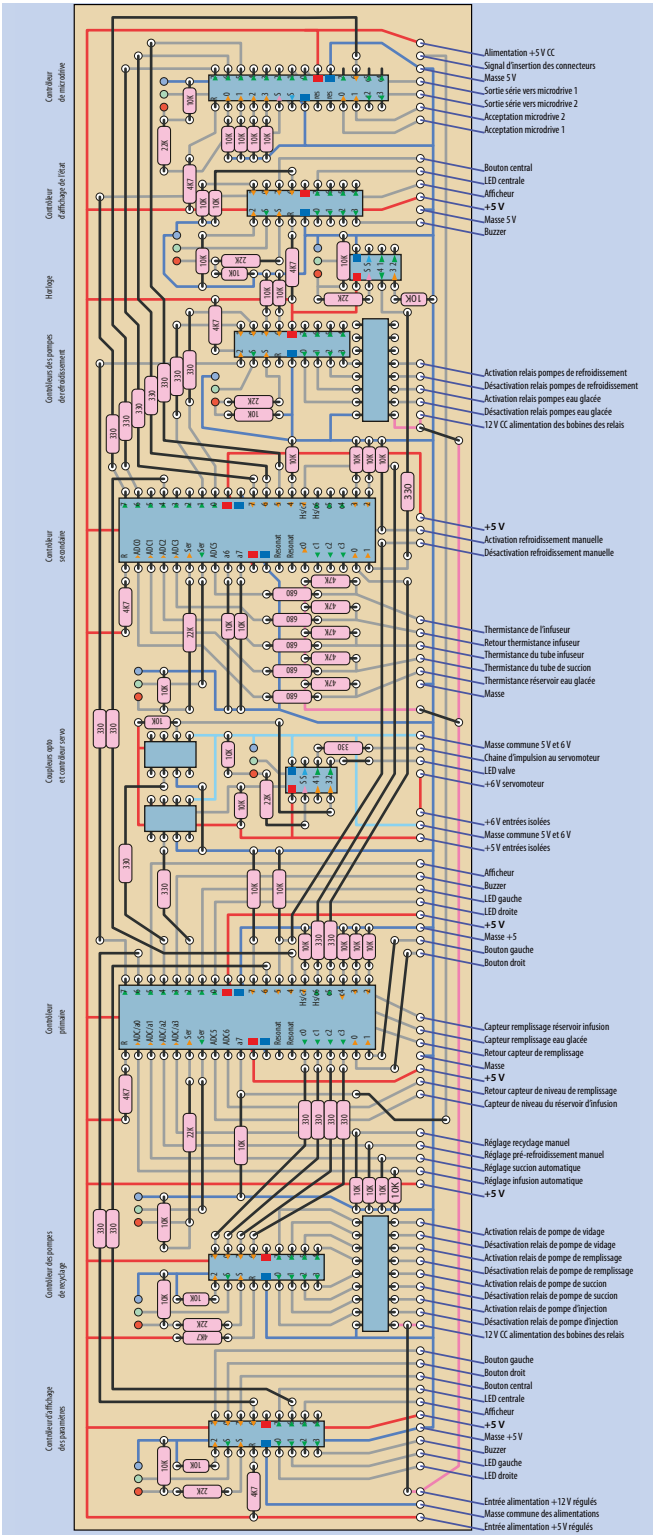


Figure 31-2. *Plan de câblage d'un système de contrôle de refroidissement, utilisant des puces PICaxe.*

L'excellente qualité de la documentation PICaxe a été une des raisons majeures qui m'ont permis cette réalisation. Mes raisons de le mentionner paraissent évidentes, car leur site web propose :

- La référence complète de leur langage.
- Un excellent tutoriel exhaustif.
- Tout est disponible en un seul endroit, inutile de multiplier les recherches internet par une navigation intense.
- Support technique disponible 24 h/24.

Leur EDI m'a permis de simuler le fonctionnement de mon programme avant de le téléverser dans les microcontrôleurs. À la date d'écriture de cet ouvrage, toutes ces possibilités sont encore offertes par Revolution Education.

Limitations

Les critiques arguaient que l'antique BASIC utilisé pour les produits PICaxe était une impasse qui ne permettait pas l'écriture de code structuré. Je pense que l'on peut écrire des programmes structurés dans n'importe quel langage, il suffit de le vouloir, mais quoi qu'il en soit, je ne suis pas sûr que ce soit un réel problème pour programmer un microcontrôleur. De façon générale, un bloc de code s'exécute dans une boucle. Il lit les valeurs d'entrée des capteurs et boutons, pilote des moteurs ou des LED, puis recommence. La structuration n'est pas une préoccupation importante quand il n'y en a pas.

Ce qui m'importait, quand j'ai commencé à aborder les microcontrôleurs, c'était qu'un langage devait être rapide à mettre en œuvre et facile à comprendre, en particulier si je devais revenir sur le programme une année ou deux plus tard. Voici un extrait du code de mon système de refroidissement :

```
checkinputs:


temp = icepin
if temp < icestatus then: outbits =_
   outbits or 1: endif
if temp > icestatus then: outbits =_
   outbits or 2: endif
icestatus = temp


if noperfcool = 1 then
   if perfstatus = 1 then
      perfstatus = 0
      outbits = outbits or 4
   endif
else
   temp = perfpin
   if temp < perfstatus then:_
      outbits = outbits or 4: endif
   if temp > perfstatus then:_
      outbits = outbits or 8: endif
   perfstatus = temp
endif
```

Vous n'allez pas comprendre la signification des noms des variables ou le rôle des commandes, mais vous pouvez voir qu'il s'agit d'une série d'instructions simples comportant peu de ponctuation.

Les critiques se plaignent également que les produits Revolution n'étant pas open source, ils n'ont jamais attiré une communauté de développeurs offrant de nouveaux produits innovants. C'est exact, mais je pense que c'est un avantage. J'aime travailler avec les sociétés qui gardent le contrôle du matériel, en complément du langage de programmation. La documentation ne risque pas d'être obsolète, et je n'ai pas à me soucier de l'évolution rapide des versions selon le type de puce utilisé.

Les anciens circuits intégrés PIC sont limités par les standards actuels. Ils n'ont pas beaucoup de mémoire et il leur manque des possibilités importantes comme l'arithmétique en virgule flottante (toutefois, un coprocesseur est disponible). Ils restent toutefois un choix intéressant pour débuter dans ce domaine, permettant d'obtenir un résultat de façon relativement simple, sans un gros investissement. Je ne pense pas que la sophistication des microcontrôleurs soit intéressante dans ce contexte.

Ayant exposé ma position, j'en reste là, car les langages de programmation ont toujours été un sujet de contestation, je sais que beaucoup de gens seront en désaccord avec moi. Passons maintenant à l'alternative la plus évidente.

Technique : Python

Le langage Python a été conçu par Guido van Rossum, un programmeur Hollandais qui était un fan de la troupe du cirque volant des Monty Python. C'était à nouveau un nom frivole, mais Python répondait à de sérieux besoins à son lancement, en 1991. Selon le Python Institute, van Rossum le voulait :

- Simple et intuitif, mais aussi puissant que ses concurrents.
- Open source, afin que tout le monde puisse contribuer à son développement.
- Être un code compréhensible en anglais naturel.
- Convenant aux tâches quotidiennes, offrant un temps de développement raccourci.

D'une certaine façon, c'était une réaction contre certains aspects du langage C++. Quoi qu'il en soit, les objectifs avaient du sens pour tous, en particulier quand Python s'est enrichi de capacités avancées, comme la possibilité d'exécuter des procédures via Internet. Le langage devint très populaire et largement enseigné dans les écoles.

Python a été développé pour les ordinateurs de bureau, et dans sa version la plus simple, il est aussi facile à comprendre que BASIC. Voici un extrait de code comptant le nombre de mots dans une saisie au clavier par un utilisateur :

```
# Nombre de mots

mots = input("Entrez des mots, terminez par
Entrée: ")

total = 1

for n in range(len(mots)):

   if(mots[n] == ' '):

      total = total + 1

print("Nombre de mots = ", total)
```

Le mot « print » signifie « afficher à l'écran », bien qu'il puisse être adapté pour diriger la sortie vers une imprimante. Vous pouvez constater que Python est familier et informel quand il est utilisé pour effectuer une tâche élémentaire de ce type.

Il y a des faiblesses évidentes dans cette routine, car elle ne traite pas les problèmes tels que la présence de plusieurs espaces entre chaque paire de mots. Python offre des façons plus simples de le faire, j'ai inclus cet exemple uniquement à titre de comparaison.

Une routine équivalente en BASIC montre des signes de ressemblance :

```
' Nombre de mots

print"Entrez des mots, terminez par Entrée:";

line input mots$

total = 1

for n=1 to len (mots$)

   if mid$(mots$,n,1)=" " then_

      total = total + 1

next

print"Nombre de mots="; total
```

La figure 31-3 contient un exemple plus conséquent en Python. Ce programme fait exactement la même chose que dans les « Dés plus sophistiqués » écrits en C Arduino que j'ai reproduit sur la figure 30-2. Ainsi, vous pouvez les comparer.

En pratique, si vous n'écrivez pas des programmes très longs et complexes les différences entre les langages paraissent minimes.

Choisir un langage à utiliser devient plus compliqué si vous envisagez de poursuivre professionnellement votre activité de programmation des ordinateurs. En ce cas, l'apprentissage de Python serait un atout dans l'évolution de votre carrière.

```
# Nicer Dice - Raspberry Pico MicroPython version

from machine import Pin
from utime import sleep, ticks_ms, ticks_add, ticks_diff
from urandom import randint

l1 = Pin(14, Pin.OUT) # middle, two leds board pin 19
l2 = Pin(15, Pin.OUT) # center, one led  board pin 20
l3 = Pin(13, Pin.OUT) # corner, two leds board pin 17
l4 = Pin(16, Pin.OUT) # corner, two leds board pin 21

button = Pin(21, Pin.IN, Pin.PULL_UP)

leds = [l1, l2, l3, l4]

ignore = ticks_add(ticks_ms(), 2000)

def checkbutton():
    global ignore
    sleep(0.050)
    while button.value() == 0:
        pass
    sleep(0.050)
    while button.value() == 1:
        pass
    ignore = ticks_add(ticks_ms(), 2000)

while True:
    spots = randint(1, 6)

    for l in leds:
        l.low()

    if spots == 6:
        l1.high()
    if spots == 1 or spots == 3 or spots == 5:
        l2.high()
    if spots > 3:
        l3.high()
    if spots > 1:
        l4.high()

    sleep(.020)
    if ticks_diff(ticks_ms(), ignore) > 0 and button.value() == 0:
        checkbutton()
```

Figure 31-3. *Le programme des dés plus sophistiqués écrit en C Arduino, reproduit sur la figure 30-2 est ici retranscrit en langage Python.*

La plus importante, et la plus délicate question, en supposant que vous soyez intéressé par Python, est de définir le moyen le plus rapide et efficace d'apprentissage de Python, en particulier pour les microcontrôleurs. Je pense que tout le monde admettra qu'il est plus facile d'apprendre n'importe quelle version du langage C. Je vais néanmoins aborder ce point.

Le système micro:bit

Le plus logique, pour commencer votre apprentissage, serait d'utiliser un système de développement conçu uniquement pour la formation : or la carte *micro:bit* répond à ce critère. Développée au Royaume-Uni par la BBC, elle est considérée comme un « micro-ordinateur », mais elle possède en fait les caractéristiques typiques d'un microcontrôleur, par exemple des entrées pour des capteurs ou des boutons-poussoirs.

La carte micro:bit peut être programmée en trois langages : Python, Scratch et MakeCode. En ce qui concerne Python, il s'agit d'une version de MicroPython, à laquelle ont été ajoutées des fonctionnalités spécifiques à la carte micro:bit, tandis que Scratch (développé au MIT) est un langage graphique, et MakeCode est un autre langage graphique (développé par Microsoft). Je commencerai par Scratch car il est considéré comme étant le plus simple point d'entrée possible à la programmation.

Scratch représente les instructions de codage sous forme de pièces de puzzle, qu'il faut assembler sur l'écran de votre ordinateur, pour réaliser un programme que vous copiez ensuite sur le microcontrôleur. Les pièces de puzzle ne peuvent s'assembler que d'une manière limitée, afin d'éviter de pouvoir faire des erreurs. Quand vous assemblez le puzzle, vous voyez presque immédiatement une animation sur l'écran. La figure 31-4 montre un exemple d'écran Scratch utilisé pour contrôler les déplacements d'un poisson sur la fenêtre.

Mon problème avec Scratch, c'est qu'il considère qu'un étudiant a une faible capacité de concentration et qu'il ne voudra pas saisir de texte. Cela me fait penser tristement à un monde où les gens de tous âges passent leur temps à s'envoyer des messages, face à leurs écrans.

Plus sérieusement, je pense qu'un langage purement visuel sous-estime les capacités des étudiants et donne la mauvaise impression que la programmation peut se limiter à des actions « glisser-déposer » avec un résultat immédiat. De plus, un langage visuel ne permet pas une transition simple vers des applications plus ambitieuses. C'est un bon moyen d'attirer l'attention des jeunes enfants, mais je ne pense pas que ce puisse être un premier pas vers un travail plus approfondi.

Cela étant dit, je vais maintenant me pencher sur l'implémentation de Python pour la carte micro:bit, qui est

documentée sur le site *microbit.org* qui propose également de nombreux tutoriels. Il s'agit principalement de petits exemples de code que l'on peut copier-coller pour observer le résultat. Cette démarche correspond à mon approche de « l'apprentissage par la pratique » utilisée dans ce livre, qui permet de mettre en œuvre, avant d'apprendre pourquoi cela fonctionne. Néanmoins, la carte micro:bit se préoccupe peu du « pourquoi », ce qui pose problème. Pour l'expliquer, je vais utiliser un exemple.

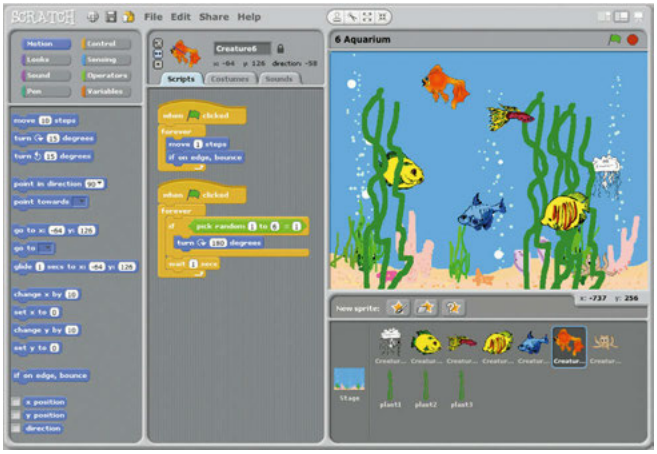


Figure 31-4. *Copie d'écran d'un programme en cours de développement en langage Scratch.*

Beaucoup de programmes micro:bit utilisent une boucle `while True`. Je n'ai trouvé qu'un tutoriel qui indiquait que la première ligne de la boucle devait être indentée, mais sans expliquer pourquoi, les autres caractéristiques de cette boucle n'étant pas davantage expliquées. Par exemple, `True` doit commencer par une majuscule mais pas `while`. La majuscule est-elle obligatoire ? `True` est-il un nom réservé, à l'inverse d'un nom de variable ? Comment expliquer la différence ? Quelles sont les règles pour le choix des noms des variables ? Quels sont les caractères autorisés, et lesquels ne le sont pas ? Et surtout, comment sortir d'une boucle `while` quand on le souhaite ?

Ces questions ne sont pas primordiales si l'on se contente simplement d'avoir une idée rapide de ce qu'est un programme, mais dès que l'on veut créer son propre code, ces questions deviennent importantes. Pour écrire un logiciel, il faut comprendre la ***syntaxe***, c'est-à-dire les règles permettant d'assembler les instructions. On peut comparer la syntaxe à la grammaire et la prononciation, en langage humain.

Quand on commence à apprendre l'anglais, on rencontre des mots contenant les lettres I et E comme dans *ceiling, hierarchy, pier, piece, receipt, deceive*... On constate que dans certains mots le I précède le E, mais dans d'autres c'est l'inverse, il est alors souhaitable de savoir pourquoi.

La règle est simple : « le I précède le E, sauf s'il est placé après la lettre C ». Ce n'est pas toujours exact, mais c'est préférable à n'avoir aucune règle.

En grammaire, il y a des règles pour vous aider à employer une apostrophe, ou indiquant la différence entre les verbes « lie » et « lay » et ainsi de suite.

Si personne ne vous a jamais parlé de ces règles, vous allez perdre beaucoup de temps à étudier des listings d'exemples, pour essayer de comprendre par vous-même. Je pense qu'il serait plus efficace de suivre une méthode d'apprentissage méthodique.

En ce qui concerne les langages de programmation, c'est encore plus important, Quand on écrit un programme, si tout n'est pas parfaitement correct, le code ne fonctionne pas, et on se trouve envahi par des messages d'erreurs.

Je ne pense pas que quiconque puisse nier que la syntaxe est essentielle, et en ce qui concerne la carte micro:bit, les tutoriels d'introduction que j'ai consultés ne mentionnent pas ce point. Pour être objectif, je dois reconnaître que beaucoup de tutoriels en ligne fournissent des exemples de code, mais n'indiquent pas les règles qu'il faut suivre pour écrire ses propres programmes.

Un défenseur de l'open source pourrait dire : « si vous voulez aller au-delà de la copie des exemples de code, vous pourrez trouver facilement les règles syntaxiques en ligne, et gratuitement ».

C'est exact, mais j'y vois un autre problème : il y a une grande différence entre des exemples de code simples, et une documentation formelle. À chaque fois que vous consultez des sites comme *microbit.org*, à la recherche d'éclaircissements, vous trouvez des documents qui souffrent de « l'oubli d'explication de l'évident ».

J'en ai fait moi-même l'expérience, en écrivant des manuels de formation. Un auteur doit connaître son sujet à fond, mais

plus on devient expert, plus il est difficile de se rappeler comment c'est quand on ne sait rien. C'est comme cela que l'on oublie d'expliquer ce qui est devenu familier tellement c'est évident.

Si vous connaissez d'autres langages de programmation, ou si vous avez l'habitude d'utiliser Unix, les tutoriels de *microbit.org* vous seront utiles. Si vous n'avez aucune connaissance préalable, il vous faudra chercher par ailleurs. Cela ne devrait pas être problématique, car il y a de nombreuses sources d'information en ligne, ce qui en soit est un problème, car devant une telle multitude, lequel choisir ?

Si vous souhaitez connaître les règles syntaxiques de la boucle `while`, vous pourriez rechercher «`MicroPython syntaxe while`».

Et vous pourriez vous rendre à l'adresse suivante :

https://courspython.com/boucles.html

Ce site contient un résumé complet et des comparaisons avec d'autres boucles, ce qui le rend très utile. Mais c'est un site qui traite du langage Python en général et ne contient pas les spécificités de MicroPython (bien que cela soit dans les arguments de recherche). Par exemple, ce site n'indique pas comment changer l'état LOW vers HIGH d'une broche de sortie.

Le site *http://www.micropython.fr/reference/* est plus spécifique au langage MicroPython ; de plus, il s'agit d'un site francophone.

Ce que je souhaite (et c'est peut-être ce que vous attendez) peut se résumer selon la règle des « trois souhaits » :

- Une ressource bien structurée,
- Dédiée à un seul thème,
- Et spécifique à un seul type de matériel.

Cette ressource devra contenir des exemples de code, mais toujours suivis par des explications bien documentées permettant d'acquérir la connaissance du langage de façon structurée et compréhensible. Après avoir parcouru l'ensemble, vous devriez être capable d'utiliser le langage par vous-même. Étonnamment, trouver une telle source d'information pour les microcontrôleurs récents peut se révéler difficile.

Mon rôle, dans ce chapitre, se limite à vous guider pour apprendre la programmation des microcontrôleurs. Je dois avouer que je suis frustré de ne pas avoir trouvé ce que, par expérience, je vous recommande. Je connais des gens qui y sont parvenus en analysant des exemples et en les comparant afin de comprendre la syntaxe de cette façon, mais ce n'est pas une méthode très efficace.

Elle a également un aspect négatif : il subsiste toujours un vide dans la connaissance.

J'ai rencontré ce phénomène en animant des cours d'initiation aux ordinateurs, quand certains de mes étudiants arrivaient après avoir acquis par ailleurs un certain nombre d'informations. Étant donné qu'ils avaient acquis leurs connaissances par fragments, de façon non structurée, et non systématique, il leur manquait bon nombre de composantes essentielles. Les zones vides dans leur savoir ressemblaient à des bulles d'air dans le béton, ou aux trous dans le gruyère. L'aspect le plus préoccupant était de voir qu'ils n'en étaient pas conscients, car ils ne pouvaient pas savoir ce qu'ils ne connaissaient pas !

J'ai passé trois semaines à rechercher des documents intéressants pour Python et MicroPython, j'ai également acquis un pyboard qui est une plateforme de développement MicroPython. Elle m'a été envoyée sans aucune documentation, et la société qui la commercialise en propose très peu sur son site web. Ils donnent un lien vers le site MicroPython dans lequel j'ai eu des difficultés à trouver exactement ce que je cherchais pour faire fonctionner le pyboard.

Je ne dresserai pas la liste de tous les sites que j'ai parcourus, ni des produits que j'ai expérimentés, car cela ne servirait à rien, si ce n'est à évoquer la frustration de cette expérience.

Finalement, j'ai considéré que le microcontrôleur RP2040 était sans doute une bonne option.

De Pi à Pico

En janvier 2021, le RP2040 était annoncé par Raspberry Pi, une société anglaise connue pour son micro-ordinateur de la taille d'une carte de crédit, vendu par millions d'exemplaires. Ils ont développé leur propre circuit intégré, considéré comme étant le microcontrôleur à la pointe de la technique et possédant des caractéristiques

impressionnantes. Il a été commercialisé sous l'appellation Pico avec une mémoire cache de 264 K en SRAM et 2 Mo de mémoire vive de type flash.

Le Pico ressemble à l'Arduino Nano, mais il est beaucoup plus puissant. D'autres fabricants ont acquis une licence RP2040, mais je n'utiliserai ici que le Pico.

L'annonce officielle reconnaissait que certains besoins n'étaient pas couverts. Elle mentionnait ainsi : « Avec le RP2040, notre ambition n'est pas uniquement d'offrir le meilleur circuit intégré, mais également d'en proposer la meilleure documentation ».

Les ingénieurs de Rapsberry Pi ont également publié leur propre livre d'initiation : *Get Started with MicroPython on Raspberry Pi Pico*. Le livre utilise des personnages de bandes dessinées enfantines, il permet ainsi de débuter.

Un vide existe cependant entre ce livre de base et les pages d'informations de Rapsberry Pi qui souffrent du défaut « trop évident pour être expliqué », mais la société devrait rectifier ce point rapidement, en attendant, ce vide est comblé par des livres publiés indépendamment. Après les avoir étudiés, il me semble que celui publié au format Kindle réponde à mes exigences : *Programming the Raspberry Pi Pico in MicroPython* de Harry Fairhead et Mike James, malheureusement non traduit en français à ce jour.

Ce livre utilise de nombreux exemples en MicroPython et recommande de télécharger la version la plus récente du langage depuis une adresse spécifique. À ce jour, le fichier s'appelle :

```
rp2-pico-20210205-unstable-v1.14-8-g1f800cac3.
uf2
```

mais cela pourrait changer. J'hésite toujours à installer un logiciel comportant le mot « *unstable* » (version instable) dans son nom. Il est regrettable que du matériel électronique soit commercialisé dans sa version définitive alors que le logiciel qui l'accompagne semble être en perpétuel développement.

Le livre est très spécifique sur les techniques permettant de traiter les tâches courantes des microcontrôleurs : acquisition d'une entrée, suppression des rebonds d'un bouton-poussoir, utilisation des interruptions, modulation de largeur d'impulsion, communication avec d'autres dispositifs via le bus I2C (nécessaire pour certains types de capteurs et écrans d'affichage), et traitement de la conversion analogique-numérique.

Si vous souhaitez apprendre plus en détail le langage Python, les exemples contenus dans ce livre sont assez importants et sont d'un usage pratique, tout en étant expliqués de façon détaillée et facile à comprendre.

Voici un exemple qui reçoit l'entrée d'un bouton-poussoir et détermine si l'utilisateur le maintient appuyé de façon prolongée, ce que l'on apprend à mettre en œuvre pour utiliser les boutons d'une souris conjointement avec un navigateur :

```
s=0
while True:
   i=pinIn.value()
   t=time.ticks_add(time.
ticks_us(),1000*100)
   if s==0: #bouton non enfoncé
      if i:
         s=1
         tpush=t
      elif s==1: #bouton enfoncé
         if not i:
            s=0
            if time.ticks_diff(t, tpush) >
            2000000:
            print(“Bouton maintenu \n\r”)
         else:
            print(“Bouton activé \n\r”)
         else:
            s=0
while time.ticks_us()<t:
      pass
```

Quand vous lirez ces lignes, d'autres livres traitant de MicroPython spécifiquement pour le Pico auront certainement été édités. En attendant, je vais conclure en disant que si vous souhaitez utiliser un langage plus convivial que le langage C et mettre en œuvre un microcontrôleur plus puissant, le langage MicroPython sur un Pico a probablement un avenir prometteur. Alternativement, vous pouvez revenir à l'Arduino et vous rappeler de mon attirance pour le vénérable PICaxe.

Au-delà de ce livre

Oublions un instant les microcontrôleurs, pour revenir aux composants discrets. Si vous avez consacré du temps à la réalisation des expériences de ce livre, que vous reste-t-il à apprendre sur le matériel ?

Voici quelques domaines que je n'ai pas abordés :

Mathématiques. La méthode d'apprentissage par la pratique est faible en notions théoriques, j'ai tenu à éviter la plupart des calculs que vous devriez étudier lors d'une initiation plus rigoureuse à l'électronique. Si vous êtes doué en mathématiques, cela vous permettrait d'acquérir une connaissance plus approfondie de la façon dont les circuits fonctionnent.

Courant alternatif. Dans ce domaine, davantage de mathématiques sont utilisées. La façon dont le courant alternatif se comporte est un sujet fascinant, mais ce n'est pas trivial.

Composants montés en surface. Certains aiment créer des circuits miniaturisés, en utilisant des composants miniatures. Ce n'est pas ce que je veux faire, mais si vous êtes suffisamment patient, les résultats seront étonnants. Recherchez en ligne : «`utilisation des composants montés en surface`».

Vous trouverez des vidéos de démonstration qui montrent que ce n'est pas trop difficile, si vous avez la patience et ne tremblez pas trop (ce qui n'est pas mon cas).

Tubes électroniques. Aujourd'hui, ils se limitent à un intérêt historique, Mais il y a un côté magique à la beauté de leur enveloppe en verre, contenant les éléments chauffants qui émettent une lumière orange sombre, en particulier s'ils sont installés dans un boîtier décoratif. Confiés à un amateur de beaux objets, les amplificateurs et les récepteurs de radio deviennent des éléments de décoration. Certes, vous devrez manipuler des circuits utilisant des tensions élevées, mais si vous êtes prudent, le risque est acceptable.

Gravure des circuits imprimés. Après avoir conçu un circuit, il faut créer un plan des pistes de cuivre d'un *circuit imprimé*, souvent appelé *PCB*. Cela se fait en réalisant des dessins avec un logiciel de conception qui génère des données dans un format compréhensible par les fabricants de PCB. Vous pouvez également faire vous-même votre gravure, ce qui n'est pas très difficile mais nécessite des fournitures spéciales.

Expériences avec des tensions élevées. C'est un sujet que je n'ai pas du tout mentionné. Des étincelles géantes du type de celles que Nicolas Tesla aimait apprivoiser n'ont aucune application pratique, et elles posent des problèmes de sécurité, mais elles sont étonnamment impressionnantes, vous trouverez facilement des informations pour réaliser ces expériences.

Amplificateurs opérationnels et transistors MOSFET. Ce sont des thèmes importants à découvrir, je regrette de ne pas avoir suffisamment de place dans ce livre pour les aborder.

Audio. C'est un domaine à lui seul, avec ses propres challenges, en particulier si vous abordez le codage numérique des signaux analogiques.

Pour conclure

Je crois que l'objectif d'un livre d'initiation est l'ouverture d'esprit vers un large domaine de possibilités, laissant à ses lecteurs le soin de décider comment poursuivre.

L'électronique permet un tel choix, car pratiquement toutes les applications, de la robotique aux modèles réduits radiocommandés, en passant par les télécommunications et les circuits des ordinateurs, peuvent être abordées par quelqu'un qui s'y consacre seul, à domicile, avec peu de ressources.

Dans la première édition de ce livre, mon éditeur était surpris que je veuille inclure une adresse e-mail permettant aux lecteurs de me contacter. Je suis heureux de l'avoir fait, car j'ai reçu de nombreux témoignages de personnes qui ont réalisé des choses merveilleuses. Récemment, j'ai été contacté par Assad Ebrahim, un lecteur britannique

qui avait entamé la lecture de *L'électronique en pratique*, sans avoir beaucoup de connaissances préalables, mais qui avait créé un langage de type Forth pour contrôler interactivement un Arduino. Il avait été capable d'écrire un minuscule programme de taille inférieure à 1 Ko, qui affichait des photos en haute résolution sur un petit écran OLED. Il m'en a fait une démonstration lors d'une session de visioconférence Zoom.

Personnellement, je n'ai pas beaucoup de mérite à comprendre l'électronique, je le fais facilement. Mes compétences sont dans ma capacité à les décrire et à créer des diagrammes explicatifs. Si vous avez de réelles aptitudes pour l'électronique, tout comme l'a fait Assad, vous devriez être capable d'aller bien au-delà de ce que je sais expliquer. Certains, parmi vous, prendront peut-être le temps de me présenter leurs projets.

Si ce livre vous a ouvert de nouvelles possibilités, il a largement rempli ses objectifs.

Annexe A

Spécifications du matériel

Cette annexe fournit les spécifications détaillées et les références qui vous seront nécessaires quand vous achèterez les outils, fournitures et composants électroniques. Les tableaux montrent les quantités de composants et autres consommables nécessaires aux expériences 1 à 30 dans les cinq chapitres de ce livre.

Toutes les références indiquées dans cette annexe ont fait l'objet d'une recherche afin de s'assurer qu'elles peuvent être achetées en France auprès des fournisseurs les plus importants, en ligne pour la plupart.

L'annexe B donne des recommandations concernant l'achat de ces références.

Pour avoir plus d'informations et des photos de ce matériel, consultez le début de chaque chapitre.

Ce que vous devez posséder

Ces éléments sont essentiels tout au long de ce livre :

Multimètre, ordinateur personnel, source d'alimentation de 9 V CC (pile ou adaptateur secteur), fils de tests munis de pinces crocodiles et outils de base.

Si vous souhaitez faire des soudures, comme cela est expliqué dans le chapitre 3, vous aurez besoin d'un fer à souder, de métal d'apport de soudure, de plaques de montage perforées et d'une troisième main (ou tout autre équipement vous permettant de maintenir votre ouvrage). Une loupe grossissante, de la gaine thermorétractable et un pistolet à air chaud sont conseillés.

Une plaque de montage sera nécessaire à partir du chapitre 2 du livre, ainsi que du fil de câblage en quatre couleurs (au minimum 3 mètres de chaque), pour réaliser des fils de pontage.

Matériel du chapitre 1

Multimètre

Un multimètre à gammes manuelles, permettant de mesurer des tensions, intensités, résistances et fréquence ainsi que la vérification de continuité. Le test des diodes et transistors est recommandé. La possibilité de mesurer les condensateurs serait un plus. Voir la discussion au sujet des multimètres à la page 10.

Lunettes de sécurité

Les risques étant faibles, en manipulant les circuits électroniques, une paire de lunettes d'entrée de gamme est suffisante.

Fils de tests

Chaque fil doit être équipé de pinces crocodiles à chaque extrémité. Des fils relativement courts sont conseillés.

Par exemple, le kit de 12 fils chez Adafruit, référence 1592. Idéalement, une quantité de 5, dont un rouge et un bleu ou noir et trois d'une autre couleur est nécessaire.

Pile

Une pile alcaline de 9 V, quelle que soit la marque. Quantité minimum 2. Des batteries de remplacement additionnelles pourront être nécessaires selon leur utilisation.

Connecteur de pile (optionnel)

Un support de pile de 9 V comportant des bornes de liaison aux plots de la pile de 9V et des fils dénudés à leurs extrémités. Par exemple : Eagle Plastic Devices `121-0426/0-GR`, ou Keystone Electronics `232`. Quantité : 1.

Fusibles

Des cartouches de type 2AG (diamètre approximatif 5 mm), à fusion rapide de 1 A et 3 A quelle que soit la tension supportée. Ils peuvent être remplacés par des fusibles pour automobile.

Par exemple : Littlefuse `0225001.MXP` ou `0225003.MXP` ; Quantité minimum : 1 de chaque calibre.

Diode LED générique de couleur rouge

Peu importe le fabricant. Pour les chapitres 1 et 2 du livre, des LED de diamètre 5 mm sont recommandées, car plus faciles à manipuler. Pour les chapitres 3, 4 et 5, des LED de 3 mm sont préconisées afin de pouvoir être logées dans les plaques de montages. Le rouge est préférable car cette longueur d'onde nécessite une tension et une intensité d'alimentation plus réduites que les autres couleurs. C'est une caractéristique importante pour les circuits dans lesquels les LED sont pilotées directement par des circuits intégrés logiques.

Recherchez les LED à luminosité accrue, exprimée en *microcandela* ou *mcd*. Une valeur de 400 mcd est convenable. Les LED à *boîtier diffusant* sont plus agréables à regarder que celles encapsulées dans un *boîtier transparent*. Choisir par exemple les références suivantes : Kingbright `WP710A10SRD/D` ou `/E`, ou `/F` (5 mm), ou Lite-On `LTL-4263` (5 mm).

Résistances

Un assortiment de résistances de puissance admissible ¼ W (250 mW) de tolérance 5 % est recommandé, quelle que soit la longueur de leurs fils. Voir les valeurs indiquées dans les tableaux des figures A-1, A-2, A-4, A-5 et A-6. Peu importe leur fabricant.

Plaques d'assemblage ou colliers

De tailles minimum 25 mm × 12 mm, elles doivent être galvanisées ou plaquées en zinc (pas en cuivre, ni en acier inoxydable). Vous en trouverez dans les magasins de bricolage. La référence National Hardware 4-pack model `N226-761` dont vous trouverez la description en ligne vous servira de guide.

Pièces de monnaie en cuivre

Si vous n'avez pas de pièces de monnaie en cuivre, tout autre objet en cuivre pourra convenir, à condition que sa taille soit comparable à celle d'une pièce de monnaie. Vous trouverez des objets décoratifs en cuivre dans les boutiques d'activités manuelles, ou des petites longueurs de tube de cuivre dans les commerces de bricolage, qu'il vous suffira de découper à l'aide d'une scie à métaux. Chez les détaillants de matériel automobile, vous trouverez des pinces crocodiles plaquées de cuivre. Rappelez-vous que le cuivre sera décoloré par la réaction chimique dans cette expérience.

Composants du chapitre 1	Expériences					Réutilisation:	
	1	2	3	4	5	Avec	Sans
Pile de 9 V	1	1	1	1		1	4
LED rouge standard de diamètre 5 mm		2	1		1	2	4
Fusible à cartouche de calibre 1 A				1		1	1
Fusible à cartouche de calibre 3 A				1		1	1
Citrons (ou jus de citron)					2	2	2
Plaque d'assemblage galvanisée					4	4	4
Objet cuivré					4	4	4
Résistance de 15 ohms		1		1		1	2
Résistance de 150 ohms		1				1	1
Résistance de 470 ohms		1	1			1	2
Résistance de 1K			1			1	1
Résistance de 1,5K		1	1			1	2
Résistance de 2,2K			1			1	1
Résistance de 3,3K			1			1	1

Figure A-1. *Ce tableau indique les quantités de composants nécessaires pour les expériences 1 à 5 du chapitre 1 de ce livre. La colonne « réutilisation » suppose que vous réutilisez les composants des expériences précédentes du chapitre 1. En cas de non-réutilisation, la quantité est augmentée.*

Carnet de notes

N'importe quel carnet de notes comportant au moins 50 pages vierges sera suffisant pour prendre des notes ou tracer des petits dessins.

Matériel du chapitre 2

Tournevis miniatures

Un ensemble comme par exemple le kit Stanley `66-052` contenant des tournevis Philips et à lames plates. Quantité : 1.

Petite pince plate à bec long

Elle ne doit pas dépasser 125 mm de long. Quantité : 1, n'importe quel fabricant, le moins cher possible.

Pince coupante

Elle ne doit pas dépasser 125 mm de long. Quantité : 1, n'importe quel fabricant, le moins cher possible. Essayez de trouver un ensemble pince plate à bec long et pince coupante.

Pince coupante de précision (en option)

N'importe quelle marque, le moins cher possible. Quantité : 1.

Pince à bec fin (en option)

D'environ 10 cm de long, elle peut faire partie d'un ensemble de pinces. Elles sont souvent vendues pour la confection de bijoux. Par exemple Amazon référence `B07QVPGX7 H` ; Quantité : 1.

Pince à dénuder

Elles doivent permettre de dénuder des fils de jauge 22. Par exemple, Irwin Wire Vise Grip référence `2078309`. Quantité : 1.

Plaque de montage

Ce sont des *plaques d'essais sans soudure*, ou *plaques de circuit imprimé* ou *plaques de prototypage*. Elles doivent comporter des bus doubles et au minimum 800 trous. Une bande rouge et une bande bleue doivent être imprimées à côté de chaque bus pour les différencier clairement.

Par exemple, Elegoo `MB-102`, ou Sparkfun `PRT-00112`, ou Jameco `2157706`. Quantité : 1. Néanmoins, en posséder plusieurs, vous permettra de conserver un circuit déjà réalisé, au lieu de devoir le désassembler pour câbler le suivant.

Fil de câblage

Parfois appelé *fil en vrac*. Peu importe le fabricant, fil de jauge 22 (0,63 mm) en cuivre ou étamé monobrin, isolation sans importance, au minimum 3 m de chaque couleur rouge, bleue, jaune et verte. D'autres couleurs peuvent être choisies mais elles ne correspondront pas aux plans du livre.

Par exemple : Adafruit référence `1311`.

Composants du chapitre 2	Expériences						Réutilisation:	
	6	7	8	9	10	11	Avec	Sans
Fils de test avec pinces crocodiles	5	3					5	5
Interrupteur SPDT à glissière broches 5 mm	2						2	2
Interrupteur SPDT à glissière broches 2,5 mm					1		1	1
LED générique rouge	1		2	1	1	2	2	7
Relais DPDT 9 V CC		2	1		1		2	4
Interrupteur tactile		1	2	2	2	2	2	9
Transistor 2N3904					1	6	6	7
Potentiomètre ajustable de 10K					1		1	1
Haut-parleur de 8 ohms						1	1	1
Résistance de 100 ohms			1	2	1	1	2	5
Résistance de 470 ohms	1		1	1	2	1	2	6
Résistance de 1K			2	2	1	1	2	6
Résistance de 4,7K						4	4	4
Résistance de 10K			1	2		1	2	4
Résistance de 33K					1		1	1
Résistance de 47K						2	2	2
Résistance de 100K					1		1	1
Résistance de 330K					1		1	1
Résistance de 470K						2	2	2
Condensateur de10 nF						3	3	3
Condensateur de 1 µF			1			2	2	3
Condensateur de 47 µF						1	1	1
Condensateur de 100 µF			1	1			1	2
Condensateur de 1 000 µF			1	1	1		1	3

Figure A-2. *Ce tableau indique les quantités de composants nécessaires pour les expériences 6 à 11 du chapitre 2 de ce livre. La colonne «réutilisation» suppose que vous réutilisez les composants des expériences précédentes du chapitre 2. En cas de non-réutilisation, la quantité est augmentée.*

Fil multibrins (en option)

Peu importe le fabricant, fil de jauge 22 (0,63 mm) en cuivre ou étamé, tension d'isolement sans importance, minimum 8 mètres, couleur quelconque.

Fils de pontage (en option)

Vous pouvez acheter des fils de pontage préparés, au lieu de les fabriquer vous-même à partir de fil de câblage, mais leurs couleurs ne correspondront pas à celles des plans de ce livre. Une boîte d'assortiment sera suffisante. Peu importe le fabricant. Cherchez «`Assortiment de fils de pontages`».

Interrupteur à glissière

Pour l'expérience 6, il sera relié par des fils de tests avec pinces crocodiles : SPDT ON-ON (Unipolaire à double position), intensité et tension de service sans importance, broches de forme quelconque, **si possible espacées de 5 mm environ.**

Par exemple : E-switch EG1201ou EG1201A. Quantité : 2.

Pour les autres expériences, SPDT ON-ON (unipolaire à double position), intensité et tension de service sans importance, broches à souder ou traversantes **espacées de 2,54 mm afin de correspondre aux trous d'une plaque de montage.** Quantité : 3.

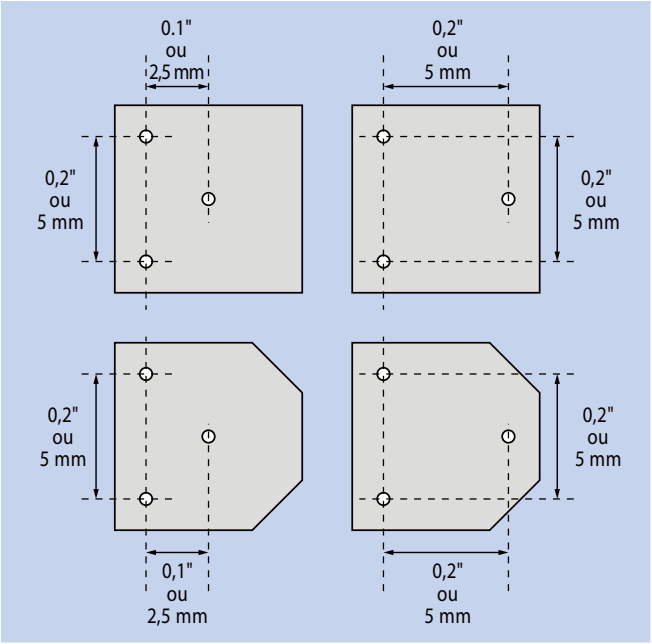


Figure A-3. *Espacement des broches à respecter pour les potentiomètres ajustables.*

Interrupteur tactile

Bouton-poussoir rond comportant deux broches à souder, espacées de 5 mm environ.

Par exemple : Alps SKRGAED-010, ou TE connectivity FSM2JART, ou Panasonic EVQ-PV205K, ou Eagle/Mountain Switch TS7311T1601-EV.

Vous pouvez les remplacer par un modèle rectangulaire (pas carré) muni de deux broches courbées espacées de 6 mm environ que vous pouvez redresser pour pouvoir les insérer dans la plaque de montage.

Par exemple : Panasonic EVQ-PE605T, ou C&K PTS 635SH50LFS. De légères différences dans les références concernent la couleur des interrupteurs, ou d'autres caractéristiques qui sont sans importance. Voir les représentations sur la figure 6-22. Quantité : 10.

Relais

DPDT (Bipolaire à double position) type « 2 Form C », avec une bobine de 9 V CC, intensité maximum des contacts sans importance, sans verrouillage, muni de broches à souder.

Par exemple : Omron G5V-2-H1-DC9, ou Omron G5V-2-DC9, ou Fujitsu RY-9W-K, ou Axicom V23105-A5006-A201.

Si vous utilisez un relais différent, vous risquez d'avoir un brochage incompatible. Vous devrez alors consulter les fiches techniques du fabricant et comparer le brochage et les caractéristiques indiquées à la page 77.

Potentiomètre ajustable

Parfois appelés *potentiomètres réglables*, ils peuvent également être appelés *résistances ajustables*, ou plus simplement *ajustables*. Voici les caractéristiques importantes des potentiomètres ajustables utilisés dans les expériences de ce livre, qui devront pouvoir être insérés dans une plaque de montage :

Dimensions : Diamètre ou longueur pour les modèles rectangulaires entre 6 et 8 mm, ou ¼ de pouce.

Monotour, à réglage sur le dessus.

La disposition des broches des modèles acceptables est représentée sur la figure A-3. Certains modèles ont des broches rondes et droites, d'autres peuvent être plates et recourbées (voir la figure 6-23). Les broches rectilignes s'insèrent plus facilement dans les plaques de montages et seront plus fermement maintenues. Les broches recourbées sont acceptables si vous les redressez à l'aide de votre pince plate.

Par exemple : TT Electronics séries 36F ou 36PR, Amphenol série N-6L50, Vishay série T7, et Bourns séries 3306F, K, P, W, ou les séries Bourns 3362F, H, P, R. Des lettres

ou chiffres additionnels dans les références dépendront de la valeur ou d'autres caractéristiques.

Transistor

Le transistor **2N3904** est un transistor bipolaire NPN, utilisé tout au long de ce livre. Les lettres ajoutées à la référence peuvent décrire le format de leur conditionnement, et peuvent être ignorées, en prenant soin, toutefois, de vous procurer un modèle à fils traversants.

Par exemple : On Semiconductor **2N3904**. Quantité : 10.

Condensateurs

Des condensateurs en céramique sont recommandés pour les valeurs n'excédant pas 1 µF, électrochimiques pour les valeurs supérieures. Vous pouvez utiliser un condensateur en céramique au lieu d'un condensateur électrochimique, mais pas l'inverse, sauf si vous êtes certain que la polarité de la tension qui lui est appliquée ne sera pas inversée car un condensateur électrochimique est polarisé, contrairement à un condensateur en céramique. Pour les condensateurs en céramique, le type exact n'est pas important, assurez-vous cependant qu'ils peuvent supporter une tension de service de 12 V CC (une valeur supérieure conviendra, mais le composant sera plus encombrant). Consulter les tableaux des figures A-1, A-2, A-4, A-5 et A-6 pour les valeurs et quantités.

Haut-parleur

Parfois appelé *transducteur*. Si vous devez spécifier un type, choisissez un modèle électromagnétique, de diamètre de 40 à 50 mm, d'impédance 8 ohms, pour une puissance admissible de 250 mW ou plus, et muni de fils de connexions.

Par exemple : CUI Devices **GF0501**. Quantité : 1.

Matériel du chapitre 3

Adaptateur secteur

Il est aussi appelé *Adaptateur CA-CC*, mais il faut surtout vérifier qu'il délivre une tension continue CC, pas alternative CA. Évitez les modèles *universels* dont la tension de sortie est réglable, mais en général moins bien régulée que celle d'un modèle à tension unique. Prévoir une tension de sortie de 9 V CC sous une intensité minimale de 300 mA (0,3 A). Le connecteur de sortie n'a pas d'importance, car vous devrez le supprimer. Quantité : 1.

Fer à souder de faible puissance

Pour les travaux d'électronique, il doit avoir une puissance de 15 W. Achetez le plus petit que vous pouvez trouver. Vous pourrez parfois le trouver dans un ensemble comprenant un support, à condition que ce dernier soit lourd et résistant, pas un simple reposoir en métal. La panne du fer doit être suffisamment petite pour pouvoir souder les composants sur une plaque perforée de trous espacés de 2,54 mm.

Par exemple : Weller **SP15NUS**. Quantité : 1.

Support de fer à souder

Il est nécessaire pour reposer un fer à souder en toute sécurité. Il peut faire partie d'un dispositif dit « troisième main » décrit page suivante.

Par exemple : Weller **PH70**, mais d'autres marques similaires peuvent être moins coûteuses. Quantité : 1.

Métal d'apport de soudure

Il faut absolument choisir du métal d'apport de soudure *pour travaux d'électronique* avec une *âme de colophane* (flux de soudure), de diamètre 0,5 à 1 mm.

Quantité : pour souder quelques projets, un mètre suffira.

Composants du chapitre 3	Expériences			Réutilisation	
	12	13	14	Avec	Sans
LED générique rouge de 3 mm		1	2	2	3
Transistor 2N3904			2	2	2
Résistance de 470 ohms		1		1	1
Résistance de 47K			2	2	2
Résistance de 470K			2	2	2
Condensateur de 1 µF			2	2	2

Figure A-4. *Ce tableau indique les quantités de composants nécessaires pour les expériences 12 à 14 du chapitre 3 de ce livre. La colonne « réutilisation » suppose que vous réutilisez les composants des expériences précédentes du chapitre 3. En cas de non-réutilisation, la quantité est augmentée.*

Fer à souder de puissance moyenne (en option)

Pour pouvoir souder des pièces de dimensions plus élevées, qui absorbent davantage la chaleur.

Par exemple : Weller Therma-Boost **TB100**. Quantité : 1.

Loupe grossissante

N'importe quelle loupe de diamètre approximatif 25 mm, pouvant être tenue proche des yeux. Une loupe de bijoutier conviendra.

Troisième main (en option)

Il existe plusieurs modèles différents. Pour éviter un choix incorrect, utilisez la recherche suivante : «`troisième main électronique`».

Choisissez celle dont vous préférez l'aspect. Elles comportent parfois un support de fer à souder ce qui est pratique. Une loupe peut également être incorporée, mais elle n'est en général pas très utile car elle ne peut pas être tenue manuellement et assure un grossissement souvent inférieur à 2×.

Contreplaqué (en option)

Afin de protéger votre plan de travail durant les opérations de soudure, une planche de contreplaqué ou autre matériau, d'épaisseur minimum 6 mm, fera l'affaire.

Pinces crocodiles en cuivre (en option)

Faites une recherche en plaçant les mots entre parenthèses. Le cuivre évacue davantage la chaleur que l'acier. Si vous utilisez néanmoins une pince crocodile d'un de vos fils de tests, son action sera raisonnablement efficace.

Plaque perforée (non cuivrée)

Nécessaire uniquement pour l'expérience 14. Ne pas utiliser une plaque cuivrée pour ce projet. Si votre recherche est infructueuse, essayez : «`Plaque perforée vierge`».

On les trouve également sous le nom *veroboard*.

Quantité : une plaque d'environ 10 cm × 20 cm sera suffisante pour trois petits projets.

Plaque perforée (cuivrée)

Ce type de plaque est utilisé pour la version terminée de l'expérience 18, mais vous pouvez l'utiliser pour d'autres projets si vous souhaitez réaliser une version permanente d'une plaque de montage. Préférez le type comportant des pistes de même configuration que les liaisons internes d'une plaque de montage.

Par exemple : Busboard `SB830`, ou faites une recherche «`Adafruit Perma proto`».

Quantité : 1 pour chaque projet que vous souhaitez réaliser de façon permanente.

Gaine thermorétractable

Les prix sont très variables ; eBay est une bonne source d'approvisionnement d'assortiments. Utilisez de la gaine de 6 mm et 10 mm de diamètre pour la plupart des petits projets (le rétrécissement est d'environ 50 % du diamètre original). Quantité : environ 60 cm de chaque taille (parfois détaillées en plus petites longueurs), peu importe la couleur.

Pistolet à air chaud (en option)

Vous pouvez utiliser un sèche-cheveux pour chauffer la gaine thermo-rétractable, en particulier en ajoutant un cône cartonné pour diriger l'air chaud, mais un pistolet à air chaud sera plus efficace. Procurez-vous le plus petit qui soit proposé pour des travaux d'électronique Je ne recommande pas les pistolets sans fils qui sont plus lourds et plus coûteux.

Par exemple : `NTE HG-300D` ou Wagner Furno `300`. Quantité : 1.

Cordons de mesure à grip-fils (en option)

Pour utiliser avec votre multimètre, chaque fil est muni d'un crochet à ressort à une extrémité et d'une fiche pour l'insérer dans votre multimètre à l'autre extrémité. Recherchez *minigrabber*, mais n'achetez pas des fils de tests qui ont des crochets à leurs deux extrémités. Quantité : 1 noir et 1 rouge, vendus en général par paire.

Boulons (en option)

Pour fixer les plaques perforées dans un coffret, utilisez des boulons de diamètre 2,5 ou 3 mm, de longueur 10 à 12 mm, à tête plate. Préférez des vis associées à des écrous à blocage nylon.

Coffret pour montage (en option)

Pour faciliter vos recherches, utilisez les termes : «`coffret pour montage électronique`», ou «`boîtier électronique`».

Les moins coûteux, faciles à utiliser, sont en plastique ABS. Quantité : 1 pour chaque projet permanent.

Barrettes de connexion header (en option)

Il s'agit de barrettes de petits connecteurs femelle et de fiches. Ils sont découplables selon les besoins.

Par exemple : Mill-Max `800-10-064-10-001000` et `801-93-050-10-001000`, que l'on trouve chez les fournisseurs de composants électroniques, ou `3M 929974-01-36-RK` et `929834-01-36-RK`. Quantité : 1 barrette de 64 fiches mâles et 1 barrette de 64 connecteurs femelles.

Matériel du chapitre 4

Circuits intégrés

Consultez les premières pages du chapitre 4 en ce qui concerne les circuits intégrés. Tous les circuits intégrés dont vous avez besoin sont listés sur la figure A-5. Il serait judicieux de vous procurer des pièces de rechange de chaque référence, car les circuits pourraient être endommagés par une erreur de tension ou de polarité de l'alimentation, ou en cas de surcharge de leurs sorties, tout comme par des décharges électrostatiques.

Tous les fabricants peuvent être choisis. Le *packaging* d'un circuit intégré fait référence à son *facteur de forme*. Lors d'une commande, cette caractéristique doit être vérifiée soigneusement afin d'éviter d'acheter, par erreur, des composants montés en surface. Tous les circuits intégrés doivent être de type *DIP à broches traversantes* (*Dual Inline Package* dont les broches sont espacées de 2,54 mm). On les trouve également sous le type *PDIP* (*Plastic Dual Inline Package*). Le préfixe DIP ou PDIP est suivi du nombre de broches, par exemple DIP-14 ou PDIP-14.

Les composants montés en surface ont en général un descripteur de boîtier commençant par S, par exemple SOT, ou SSOP. N'achetez pas de composant dont le boîtier est de type « S ».

Deux familles de circuits intégrés sont utilisées dans ce livre : la famille 4xxx et la famille 74 HCxx. Les références peuvent comporter des lettres ajoutées par leurs fabricants, comme par exemple `74 HC00 DBR` (Texas Instruments), ou `MC74 HC00ADG` (On Semiconductor). Ces références sont fonctionnellement identiques. Lors de vos recherches, vous verrez que la référence générique `74 HC00` est probablement encadrée par des lettres propres à chaque fabricant. Faites une recherche à partir de la référence générique, sans préfixe ni suffixe. Par exemple `74 HC08` et non pas `SN74 HC08N` qui serait plus restrictif.

Les anciens circuits intégrés TTL, tels que la série `74LSxx`, posent des problèmes de compatibilité. Ils ne sont ni utilisés, ni recommandés pour les projets de ce livre.

Composants du chapitre 4	Expériences									Réutilisation :	
	15	16	17	18	19	20	21	22	23	Avec	Sans
Temporisateur 555	1	2	3	3		1	2		1	3	13
Interrupteur SPDT à glissière	1		1				1	1		1	4
Potentiomètre ajustable de 500K	1	1								1	2
Interrupteur tactile	2		1	3	2	9	2		2	9	21
LED générique rouge de 3 mm	1		4	3	1	1	3	2	14	14	29
Haut-parleur de 8 ohms		1								1	1
Potentiomètre ajustable de 10K		2		1						2	3
Diode 1N4148		1	1							1	2
Compteur 4026B				3						3	3
Afficheur LED à 7 segments				3						3	3
Régulateur LM7805					1	1	1	1	1	1	5
Circuit intégré ET 74HC08					1	2			1	2	4
Circuit intégré OU 74HC32					1		1		1	1	3
Pile de 9 V						1				1	1
Relais DPDT 9 V						1				1	1
Transistor 2N3904						1				1	1
Circuit intégré NON-OU 74HC02								1		1	1
Compteur 74HC393									1	1	1
Circuit intégré NON-OU 74HC27									1	1	1
Résistance de 100 ohms		1								1	1
Résistance de 470 ohms	1		4	2		1	3		6	6	17
Résistance de 1K		3		3	1			2	4	4	13
Résistance de 4,7K				1						1	1
Résistance de 10K	3	3	5	5	2	9	3	2	2	9	34
Résistance de 47K			4	1						4	5
Résistance de 100K						1			1	1	2
Résistance de 470K		1	2	2						2	5
Condensateur de 0,01 µF	1	2	2	2		1			2	2	10
Condensateur de 0,047 µF				1						1	1
Condensateur de 0,1 µF					1	1	3	1	2	3	8
Condensateur de 0,47 µF		1	2	2	1	2	1	1	1	2	11
Condensateur de 10 µF	1	1	3	1		1			1	3	8
Condensateur de 100 µF		1	2	1					1	2	5

Figure A-5. *Ce tableau indique les quantités de composants nécessaires pour les expériences 15 à 23 du chapitre 4 de ce livre. La colonne « réutilisation » suppose que vous réutilisez les composants des expériences précédentes du chapitre 4. En cas de non réutilisation, la quantité est augmentée.*

Temporisateur 555

Pour les projets de ce livre, faites attention de bien acheter la version *TTL* (également appelée *bipolaire*), et non la version CMOS. Les fiches techniques de la version TTL doivent mentionner « TTL » ou « bipolar », spécifier une tension

d'alimentation minimum de 4,5 ou 5 V, une consommation au repos de 3 mA au minimum, et pouvoir fournir un courant de sortie de 200 mA. Leurs références commencent souvent par `LM555`, `NA555`, `NE555`, `SA555`, ou `SE555`. Si vous faites une sélection par leur prix, les versions TTL sont en général deux fois moins coûteuses que les versions CMOS.

Dans le doute, vérifiez les fiches techniques. Les versions CMOS précisent toujours « CMOS » dans leurs premières pages, et elles autorisent une tension d'alimentation minimum de 2 V dans la plupart des cas. Leur consommation au repos se chiffre en microampères (et non pas en milliampères), et ils ne peuvent pas fournir un courant de sortie supérieur à 100 mA. Leurs références sont par exemple `TLC555`, `ICM7555` ou `ALD7555`.

Afficheur à 7 segments

L'afficheur utilisé dans l'expérience 19 doit être de type à LED, de hauteur approximative 14 mm, rouge de préférence, à faible consommation, à cathode commune, pouvant fonctionner sous une tension de 2 V et une intensité de 2 mA dans le sens direct.

Par exemple : Broadcom/Avago `HDSP-513E`, ou Lite-On `547AHR`, ou Inolux `INND-TS56RCB`, ou Kingbright `SC56-21EWA`. Voir leurs dimensions et espacement des broches sur la figure 18-1.

Matériel du chapitre 5

Aimants au Néodyme

Je suggère de consulter le site du fournisseur K&J magnetics, pour obtenir des informations très complètes sur les aimants.

www.kjmagnetics.com/neomaginfo.asp

Malheureusement, les frais d'envoi pour la France sont beaucoup trop élevés, des aimants comparables peuvent être achetés auprès de fournisseurs français ou sur eBay.

Fil de jauge 16 (diamètre 1,3 mm)

Il est utilisé pour confectionner l'antenne dans l'expérience 28. Si son coût est trop important, utilisez une bobine de 15 ou 30 m de fil de jauge 22 (0,6 mm). Ce fil devrait convenir si vous êtes relativement proche d'un émetteur de radiodiffusion.

Écouteur à haute impédance

Il n'est utilisé que dans l'expérience 28, il peut se trouver dans le catalogue **Amazon** ou sur le site **eBay.fr** ou chez quelques sites de vente de composants dont **e44 électronique**.

www.e44.com

Diode au germanium

Vous en trouverez chez différents fournisseurs dont **e44 électronique**, sur **conrad.fr** ou **eBay**, tout comme chez les grands fournisseurs **Mouser** ou **Digikey**. Leurs caractéristiques doivent mentionner leur compatibilité avec les récepteurs de radio à cristal. La référence **1n34** est un bon choix.

Cartes Arduino Uno ou Arduino Nano

Elles sont largement disponibles chez de nombreux fournisseurs tels que Mouser ou Amazon.

Composants du chapitre 5	Expériences							Réutilisation :	
	24	25	26	27	28	29	30	Avec	Sans
8 m de fil de câblage de jauge 22 (Ø 0,64 mm)	1			1				1	1
Trombones	1							1	1
Aimant au néodyme de Ø 5 mm x 35 mm		1						1	1
60 m de fil de câblage jauge 22, 24 ou 26		2		1	1			2	4
LED générique rouge de 3 mm		1		2		1	7	7	11
Condensateur électrochimique de 1 000 µF		1		1				1	2
Diode 1N4148		1						1	1
En option, aimant de Ø 20 mm x 25 mm		1						1	1
En option, 120 m de fil émaillé Ø 0,4 mm		1						1	1
Un haut-parleur de Ø 5 cm, le moins cher possible			1		1			1	2
Résistance de 47 ohms				2				2	2
Résistance de 470 ohms				1		1	7	7	9
Interrupteur tactile				2				2	2
Écouteur à haute impédance					1			1	1
15 à 30 m de fil de jauge 16 (Ø 1,3 mm)					1			1	1
Corde en polypropylène d'environ 3 m					1			1	1
Diode au germanium					1			1	1
Fils de tests munis de pinces crocodiles					4			4	4
En option, circuit amplificateur LM386					1			1	1
En option, haut-parleur ou buzzer passif					1			1	1
Arduino Uno ou Nano						1	1	1	2
Câble USB pour Uno ou Nano						1	1	1	2

Figure A-6. *Ce tableau indique les quantités de composants nécessaires pour les expériences 24 à 30 du chapitre 5 de ce livre. La colonne « réutilisation » suppose que vous réutilisez les composants des expériences précédentes du chapitre 5. En cas de non réutilisation, la quantité est augmentée.*

Annexe B

Achat du matériel

L'ensemble des *composants et fournitures* listés dans l'annexe A peut se trouver sans difficulté auprès de fournisseurs en ligne situés en France, avec des coûts d'expédition réduits. En ce qui concerne les fournitures complémentaires, celles-ci pourront également se trouver dans des enseignes locales ou en ligne.

S'il est facile et rapide d'acheter les composants sur Internet, certains commerces locaux pourront vous proposer composants et fournitures sans devoir attendre le délai d'expédition. Je vous conseille les magasins de pièces auto, les grandes surfaces de bricolage et les boutiques spécialisées en fournitures pour loisirs créatifs, qui seront à même de vous procurer le matériel nécessaire.

Le tableau de la figure B-1 indique les commerces susceptibles de vous fournir les éléments listés. J'ai indiqué le fil multibrin de jauge 22 (diamètre 0,63 mm) que vous pourrez trouver dans un magasin de bricolage, mais pas le fil rigide monobrin qui n'est pas courant dans les magasins non spécialisés.

Achat de l'outillage et des fournitures

Type de fourniture	Type de magasin		
	Bricolage	Pièces auto	Loisirs créatifs
Multimètre	●	●	
Lunettes de sécurité	●		
Fusibles 1 A et 3 A		●	
Plaques d'assemblage ou colliers	●		
Tournevis miniatures		●	●
Petites pinces plates à bec long	●	●	●
Pince plate à bec fin			●
Pinces coupantes	●	●	●
Pinces à dénuder	●	●	
Fil multibrin de diamètre 0,63 mm	●	●	
Fer à souder de 30 W	●	●	
Support de fer à souder	●		
Soudure pour travaux d'électronique	●	●	
Loupe portative			●
Pistolet à air chaud	●	●	
Connecteurs rapides	●		
Outil à ébavurer	●		
Fraises	●		
Gaine thermorétractable	●	●	
Contreplaqué	●		●
Boulons	●	●	
Coffrets de montage			●

Chaînes de magasins populaires		
Bricolage	Pièces auto	Loisirs créatifs
Bricot Dépôt Bricomarché Bricorama Leroy-Merlin Weldom	Norauto Speedy Feu Vert Roady	Amazon BHV Bricorama Cultura Delbard Truffaut

Figure B-1. *Magasins de détail où trouver les fournitures diverses.*

Achat en ligne de composants électroniques

Fournisseurs les plus importants

Les trois fournisseurs indiqués ci-après offrent un choix immense de composants en petites quantités. Vous pourrez même acheter un seul transistor. Si vous le faites, il vous parviendra dans un petit sachet de plastique.

Mouser Electronics

www.mouser.fr

Digikey

www.digikey.fr

Conrad

www.conrad.fr

Il existe bien d'autres fournisseurs que vous découvrirez au fil de vos recherches. Les frais d'expédition étant élevés, il est préférable d'acheter le plus possible de composants en une seule fois. La plupart des composants sont miniaturisés et légers, beaucoup d'entre eux pourront être expédiés dans une petite boîte.

eBay est une autre source pratique d'approvisionnement, qui peut vous mettre en relation avec des vendeurs français, européens, ou asiatiques. C'est intéressant, en particulier si vous achetez des assortiments. J'ai par exemple acheté des assortiments de résistances et condensateurs sur eBay. Le site propose également des fournitures diverses, fils et métaux de soudure, ou des composants devenus obsolètes et des outils.

eBay

www.ebay.fr

Autres fournisseurs

Certains autres fournisseurs proposent des matériels spécifiques, il est conseillé de parcourir leurs catalogues. Ils sont davantage tournés vers les makers, certains d'entre eux proposent du matériel de surplus moins coûteux. En voici quelques-uns :

Avtronic

https://composant-electronique.fr/

E44 Électronique

www.e44.com

Électronique Diffusion

www.electronique-diffusion.fr/

Farnell

https://fr.farnell.com/

GoTronic

www.gotronic.fr

Radiospare

https://fr.rs-online.com/web/

Amazon

www.amazon.fr

Une recherche avec les termes suivants vous les fera découvrir : « `vendeurs composants électroniques` ».

Fournisseurs asiatiques

Les prix moins élevés sont le principal avantage des achats directs chez les vendeurs chinois ou vietnamiens. Cependant, vous devrez attendre plusieurs semaines pour recevoir vos achats, mais selon mon expérience, ils vous parviennent toujours.

Ces sites mettent en relation avec de nombreux vendeurs de tous types de composants ou fournitures :

Aliexpress

https://fr.aliexpress.com/

DX

https://www.dx.com/

Banggood

https://fr.banggood.com/

Conseils d'achat

L'achat des composants et fournitures devra souvent se faire en plusieurs fois. Une recherche des fournisseurs locaux évitera des délais de réception souvent frustrants,

mais rares sont ceux qui sont spécialisés en matériel électronique.

Certains composants ne pourront pas se trouver localement : dès lors, une recherche en ligne deviendra nécessaire.

Il est parfois impossible de trouver un fournisseur français pour certains composants : un achat à l'étranger devient alors nécessaire, mais des précautions importantes sont à prendre en ce cas.

Recherche en ligne

La recherche de composants se révèle parfois plus difficile qu'un autre type de recherche. Une recherche générale, en utilisant par exemple Google, vous dirigera rapidement vers des sites commercialisant ce que vous recherchez.

Afin de ne pas perdre inutilement votre temps, il est préférable de préparer une liste d'achats, qui vous évitera également d'oublier quelque chose.

Pour les composants, il convient de rechercher selon leur référence générique : par exemple en tapant 74 HC08, les moteurs de recherche devraient vous proposer toutes les variantes de cette référence.

L'afflux de possibilités offertes par une recherche générale rend difficile le choix, et de nombreux composants ne répondront pas à certains critères que vous n'avez pas précisés, comme le type de boîtier. Il vous faudra donc affiner votre recherche en précisant certains critères.

En vous rendant sur le site d'un fournisseur particulier, des critères de recherche additionnels vous permettront de mieux cibler votre choix, mais celui-ci sera limité au catalogue de ce fournisseur, vous privant d'autres offres plus intéressantes ou correspondant plus précisément à votre choix. Le moteur de recherche de Mouser France est certainement le plus complet, mais il n'est pas totalement efficace avec les termes francisés, l'utilisation de mots anglais offrant souvent un choix plus vaste.

Choix des fournisseurs

Selon mon expérience, il est souvent difficile de trouver chez un même fournisseur tous les articles d'une liste d'achats. Afin de minimiser les coûts d'envoi, il est préférable de regrouper au maximum les achats. À partir d'un certain montant, certains fournisseurs prennent à leur charge les frais d'envoi.

On trouve souvent tout ce que l'on recherche sur eBay, cependant il convient d'être attentif aux prix pratiqués, aux frais d'envoi et à la provenance des objets achetés. Des fournisseurs chinois se trouvent souvent répertoriés sur eBay, leurs annonces sont en français, mais leurs délais de réception sont très longs. Certains toutefois ont des entrepôts en France ou en Europe ce qui minimise les durées de réception. Il en est de même pour le site Amazon.fr, toutefois moins achalandé pour les composants électroniques.

Les sites qui proposent des paniers permettent de comparer plus rapidement prix et contenus et facilitent les opérations d'achat.

Il est certain que passer des heures à comparer le prix d'achat d'un composant dont le prix est inférieur à 1 € est contreproductif, mais amusant. Faire une telle comparaison au niveau d'un panier est davantage justifié.

Les places de marché asiatiques proposent des prix attractifs mais les délais de réception peuvent dépasser un mois dans certains cas. Pour ma part, je n'ai que très rarement rencontré des difficultés avec le site Aliexpress qui se charge des recours éventuels auprès des vendeurs, en cas d'anomalies ou de non réception. Il en est de même chez eBay ou Amazon. Il faut absolument éviter les annonceurs qui ne sont pas des places de marché connues, notamment sur les réseaux sociaux, avec lesquels vous n'avez aucun recours car ils sont situés à l'étranger.

Attention : certains vendeurs étrangers peu scrupuleux proposent des prix dérisoires pour des équipements complexes, par exemple des appareils de mesure ; il faut alors s'en méfier.

Leur technique est simple :

- Ils ont des noms de sites comportant les lettres fr, faisant penser qu'ils sont français, mais il n'est rien. Les règlements se font en euros.
- Certains n'envoient rien et ne répondent pas aux réclamations. Ils sont souvent annonceurs via des publicités sur les réseaux sociaux qui n'assument aucune responsabilité.

- D'autres envoient un objet qui ne correspond pas à votre commande, dont la valeur est inférieure, et quand vous les contactez pour faire une réclamation, ils s'excusent en vous demandant de le renvoyer à vos frais. Mais comme souvent, les frais de réexpédition pour un pays d'Asie sont prohibitifs, fréquemment supérieurs au prix de l'objet, et vous refusez de devoir payer les frais de retour.

- Ils refusent de prendre en charge les frais de retour et vous proposent de garder l'objet. Il s'agit d'une forme déguisée de vente forcée. Je ne suis pas sûr qu'en insistant, le bon matériel serait envoyé par la suite, pas plus que le remboursement partiel.

Quelques recommandations

- Préparer une liste d'achats.

- Faire une première recherche à l'aide d'un moteur de recherche généraliste.

- Tenter de remplir des paniers chez les différents distributeurs, afin de pouvoir comparer rapidement les offres.

- Comparer le contenu, notamment en cas de lots, les prix, les frais d'expédition et les délais de réception prévus.

- Alternativement, se rendre sur eBay.fr ou Amazon.fr

- En cas d'achat à l'étranger, privilégiez les sites marchands réputés, évitez les sociétés qui ne fournissent pas d'adresse postale précise dans leur présentation.

- Certains moyens de paiement comme Paypal prennent en charge les frais de retour en cas de litige.

Index

2N2222
  transistors 65
2N3904
  transistors 65, 108
74HC08
  portes ET 218
74HC32
  portes OU 219
74HC393
  compteur 251
555
  ajout d'une diode 181
  bouton de blocage 238
  brochage 166
  broche de contrôle 182
  circuit compteur 207
  contrôle d'une puce par une autre 187
  durée des impulsions en mode monostable 170
  états haut et bas 168
  fonctions internes 172
  gâchette et réinitialisation 169
  mode bistable 173
  mode inversé 173
  mode monostable 171, 172
  multivibrateur monostable 167
  pic de tension 176
  reconnaître les différents circuits 166, 176
  suppression de l'impulsion initiale 172
  table des fréquences 179
  test mode astable 177
  test monostable 167
  utilisation 172
  version bipolaire 176
  version CMOS 176
  version TTL 176
4026B
  compteur 205
7400
  famille 224
7805
  régulateur de tension 216

A

Adafruit 272, 303, 331
adaptateur secteur
  guide d'achat 335
afficheur 7 segments 338
afficheur à LED
  anode commune 207
  cathode commune 207
afficheurs numériques 163, 205
aimant au néodyme 283, 338
Akro-Grid 266
alarme anti-intrusion 188, 310
aléatoire
  tirage 259
Alexander Graham Bell 286
Aliexpress 340
alimentation
  CA 76, 141
  câblage 149
  de laboratoire 270
  électrique 16
Amazon 340
ampère
  sous-multiples 30
  unité 30
Ampère, André-Marie 33
antenne 294
antirebonds 246
  à portes NON-ET 248
  à portes NON-OU 246
appareil à fréquences radio 265
Arduino
  alimentation et mémorisation 309
  carte fille 302
  cartes d'interface 302
  connecteurs d'entrée et de sortie 302
  dés électroniques 311
  EDI 301
  guide d'achat 338
  historique 300

horloge système 314
imitations 303
introduction 300
langage C 300
Le grand livre d'Arduino 274
Nano 302, 309
open source 303
paramètres 308
précautions 320
programmation 306, 316
régulateur de tension 309
shield 302
téléversement et exécution 307
test du clignotement 305
Uno 302, 309
USB 301
vérification et compilation 307
ATmega 309
auto-induction 290
Avtronic 340

B

Banggood 340
barrettes de connexion
headers 336
bascule 171, 241
antirebonds 246
bascule de Schmitt 175
bascule synchrone 249
BASIC
exemple 324
historique 321
langage de programmation 321
limitations 323
BeagleBone 300
bêta
gain en courant transistor 113
bibliothèques de code 300, 301
blocage tension continue
fondamentaux 95
bobine
blocage courant alternatif 291
charge d'un condensateur 284
comparaison avec un condensateur 290
effondrement du champ 290
formule de l'inductance 276
générateur de tension 278
récepteur à cristal 293
reproduction sonore 287
symbole 277
boîtes de rangement 266
boîtier en plastique 198
Boole, George 221
borne à visser 203
boulons 336
bouton de blocage 238
bouton-poussoir 334
Brattain, Walter 115
bureau
espace de travail 271
bus de données 240
bus double 60
bus simple 60

C

CA
courant alternatif 14
définition 34
câble plat 202
Camenzind, Hans 175
capteurs magnétiques 189
carnet de notes 18, 332
cavalier 62
CC
courant continu 14
champ magnétique
effondrement 289
génération d'une tension 278
choix des fournisseurs 341
circuit
asynchrone 249
synchrone 249
circuit intégré 161
choix 161
électricité statique 205
guide d'achat 337
logique 219
support 163
TTL et CMOS 223
citron
pile 52

clavier 236
code binaire 253
coffret de montage 140, 336
comparateurs 171
compilation 302
  Arduino 307
composants
  CMS 162
  DIP 162
  discrets 161
  expériences 1 à 5 332
  expériences 6 à 11 333
  expériences 12 à 14 335
  expériences 15 à 23 337
  expériences 24 à 30 338
  montés en surface 161
  passifs 161
  PDIP 162
  recherche en ligne 340
  stockage 265
  traversant 161
compteur
  4026B 208
  binaire 250
  décimal 250
  modulo 254
condensateur 290
  blocage tension 96
  céramique 65, 95
  chargement par une bobine 284
  circuit à relais 92
  comparaison avec inductance 290
  constante de temps 101
  couplage capacitif 104, 178
  déplacement de courant 106
  électrochimique 95
  filtrage 103
  fondamentaux 94
  guide d'achat 335
  lecture valeur 96, 97
  polarité 96
  risque de choc électrique 98
  symbole 95
  unités 94
conducteur 21
connecteur
  à écrous 138
  de pile 17, 331
Conrad 340
constante de temps
  fondamentaux 101
conversion
  pouce 157
  unités métriques 157
convertisseur analogique-numérique 300
cordon de mesure 20
  à pinces à crochets 140
  à pinces crocodiles 140
cordons de mesure
  à grip-fils 336
couplage capacitif
  en pratique 106
courant 30
  alternatif 291
  blocage par une bobine 291
  continu 34
  électrique 30
  intensité 30
  sens 55
  sens conventionnel 55, 111
croisements
  schéma 77

D

Darice Mini-storage boxes 267
Darlington
  réseau 209
déplacement de courant 106, 192
dés magiques 250
Digikey 303, 340
diode 164
  anode 164
  anti-retour 235, 290
  au germanium 338
  cathode 164
  circuit temporisateur 181
  germanium 295, 298
  redresseur 284
  roue libre 235
DIP 162, 337
dominos 139
double bus 60
DX 340

E

e44 électronique 340
eBay 340
éclairs 54
écouteur à haute impédance 338
EDI 301, 323
électricité statique 205
  protection 205
électroaimant 274
électromagnétisme 33, 265
électron 53, 111
électronique audio 265
Électronique Diffusion 340
entrée flottante 168
erreurs
  courantes plaques perforées 200
  d'alimentation 217
  de soudure 200
  recherche 120
espace de travail 269
étincelles 74

F

Faraday, Michael 96
Farads 94
  conversion 94
Farnell 340
FEM 290
fer à souder 133, 331
  attention 142
  de faible puissance 335
  de puissance moyenne 335
  où est passée la chaleur 153
  souder deux fils 143
  support 136
fiche technique 32
fil
  d'antenne 294, 338
  de câblage 60, 333
  de soudure 134
  de tests avec pinces crocodiles 16, 331
  émaillé 282
  étamé 61
  jauge 61
  magnétique 282
  monobrin 61
  multibrin 61, 333
  souder deux fils 143
fil de pontage 62, 333
  assortiment 62
  fabrication 85
  flexible 62
filtrage 127
filtre passe-bas 292
filtre passe-haut 292
flip-flop 171
fondamentaux
  ampère 30
  amplification 112
  blocage d'une tension continue 95
  capacité 94
  choix des circuits intégrés 161
  code binaire 253
  confusion entre positif et négatif 54
  constante de temps 101
  conversion décimale 42
  conversion de la formule 42
  conversion des watts 46
  couplage capacitif 104
  courant continu et courant alternatif 34
  cycle de décharge 179
  différence de potentiel 35
  diviseurs de tension 183
  filtrage 103
  hystérésis 174, 176
  inductances 277
  le hertz 126
  le volt 38
  magnétisme 275
  montages série et parallèle 43
  nature de l'électricité 53
  polarité 29
  portes logiques de base 222
  programmation ou non 310
  réflexes humains 215
  règles d'interconnexion des portes logiques 224
  résistance 21
  stockage d'une charge 92
  température, chaleur et puissance 46
  tension *vs* intensité 39
  théorie de la chaleur 147
force électromotrice 290

force magnétique 275
formule de Wheelers 276
fournisseurs asiatiques 340
fournitures
  sources d'approvisionnement 339
Franklin, Benjamin 54
fusible 17
  test 48

G

gaine thermorétractable 137, 203, 235, 331, 336
  utilisation 148
Gates, Bill 321
germanium 293
GoTronic 340
guide d'achat
  attention 341
  recommandations 342

H

haute tension 294
haut-parleur 66, 285, 335
  Amplion 286
  démontage 285
  historique 286
  piézoélectrique 297
header 336
  Arduino 302
henry 276
Henry, Joseph 277
Hertz, Heinrich 126
hystérésis
  temporisateur 555 174

I

IC 161
inductance 290, 293
  principes fondamentaux 274
  théorie 275
intensité
  directe 33
  mesure 30
interpréteur 302
interrupteur 57
  à glissière 63, 68, 334
  à lame 67
  à lames souples 189
  à l'état solide 108
  autres informations 72
  digital 113
  étincelles 74
  normalement clos 73
  normalement ouvert 73
  symbole 72, 74
  tactile 64, 334
inverseur 174
ion
  négatif 53
  positif 53
isolant 21

J

Jansson, Fredrik 262
jauge américaine 61

K

Kellogg, Edward 287
k parmi n 229

L

Lancaster, Don 263
langage C
  réactions contre 324
langue
  test 19
latch 239
LED
  génériques 332
  surcharge 29
  surchauffe 152
  symbole 76
  types 17
L'électronique en pratique 2 273
LM386 298
LM7805 164
  régulateur de tension 216

logique
origine 221
loupe 137
grossissante 331, 336
lunettes de sécurité 16, 331

M

magnétisme 274
créer de l'électricité 275
MakeCode 325
makers
mouvement 303
Marconi, Guglielmo 298
mégaohm 21
micro:bit
carte 325
MicroPython 325
microcontrôleur
avantages et inconvénients 311
comparaison avec composants discrets 310
introduction 300
programmable 265
MicroPython 325, 329
site francophone 327
Microsoft
QuickBasic 321
millicandela 164
modulation
audio 128
d'amplitude 265
radio 293
Mouser 303, 340
MS-DOS
BASIC 321
port de communication 305
multimètre 11, 331
à gammes manuelles 331
analogique 11
calibre automatique 12
calibre manuel 12
cordon 20
mesure de résistance 25
mesure de température 12
numérique 11
prix 13
réglages 19
test de continuité 68
multivibrateur astable
fonctionnement 123
transistorisé 119
multivibrateur monostable
555 167

N

néodyme
aimant 279
danger 283
NPN
transistor 110

O

ohm 21
Ohm, Georg Simon 23
onde porteuse 298, 299
open source 303
opérateurs booléens 222
ordinateur
monocarte 300
personnel 331
oscilloscope 270
oscillogramme multivibrateur 124

P

paramètres
Arduino 318
Paypal 342
PC IBM 321
PICaxe 321
câble USB spécifique 321
documentation 323
exemple de carte 322
Picoscope 270
piézoélectrique
haut-parleur 297
reproducteur 297
pile
alcaline de 9 V 331
alimentation plaque de montage 87
attention 19

cellules primaires 54
cellules secondaires 54
citron 51
connecteur 87
invention 38
mesurer sa tension 49
polarité 29
résistance interne 50
symbole 29, 75
pince
à bec fin 333
à bec long 57
à bec pointu 58
à crochets 140
à dénuder 59, 333
coupante 58, 333
coupante de précision 58, 333
crocodile en cuivre 136, 336
plate à bec long 333
pistolet à air chaud 148, 331, 336
attention 149
planche de contreplaqué 336
plaque d'assemblage 18, 332
plaque de montage
à bus simple 60
à double bus 60
bus 60, 86, 89
définition 59
identification des composants 99
miniature 59
pontage 62
recherche des erreurs 120
sans soudure 333
symboles composants 87
plaque perforée 139, 331
adaptation d'un circuit 154
cuivrée 336
erreurs courantes 200
non cuivrée 336
plaques de fixation 51
PNP
transistor 111
poire à vide 136
polarité 29
port de communication
Arduino 305
porte ET 219, 224
porte NON-ET 224
porte NON-OU 224
porte NON-OU EXCLUSIF 224
porte OU 224
porte OU EXCLUSIF 224
portes logiques 216
de base 222
potentiomètre
ajustable 64, 117, 334
symbole 116
PowerBASIC 321
programmation
Arduino 305, 307
EDI 301
pseudocode 312
sources d'information 327
programme
syntaxe 326
proton 53
pseudocode 312
puissance électrique 47
Python
exemple de code 324
historique 324
langage 324

Q

QuickBASIC 321

R

radio 292
antenne 294
récepteur 298
récepteur à cristal 293
Radiospare 340
rangement 265
Rapsberry Pi 300
MicroPython 328
Pico 327
réactance 290
inductive 290
rebonds des contacts 246
redresseur
demi-onde 284
pleine-onde 284

reed switch 189
régulateur de tension 163
  Arduino 309
relais 64, 334
  à l'intérieur 82
  à verrouillage 81
  brochage 81
  capacité de commutation 84
  circuit de démonstration 90
  comparaison avec transistor 114
  composants internes 83
  isolation électrique 228
  montage oscillateur 85
  ouverture du boitier 82
  pilotage 233
  recommandé 64
  symboles 81
  tension et courant de bobine 84
  terminologie 84
  vibration 91
reproduction sonore 287
réseau RC 93
résistance 24, 290
  achat 18
  assortiment 332
  code 25
  décodage valeur 27
  peau 23
  symbole 76
  tolérance 27
  unités 21
  valeurs 25, 27
résistance de rappel 106
  Arduino 317
résistance de tirage 107, 168
  Arduino 317
Rossum (van), Guido 324
RP2040
  microcontrôleur 327

S

schéma 29
  création 76
  croisements 77
  logiciel de simulation 76
Scratch 325
Scribner, Charles E. 74
Siemens, Ernst 286
simulation de dés 311
  Python 324
sketch
  Arduino 301
SOIC 162
son
  fréquence 287
  théorie 287
soudure
  erreurs 145, 157, 200
  flux 134
  introduction 133
  métal d'apport 335
  mythes 145
  terminologie 134
  théorie de la chaleur 147
source d'alimentation de 9 V CC
  pile ou adaptateur secteur 331
Sparkfun 303
stockage 266
  condensateurs 269
  d'une charge 92
  résistances 268
support de fer à souder 335
symbole
  alimentation 75
  autres 75
  CA 75
  condensateur 95
  inductance 277
  interrupteur 72
  LED 76
  potentiomètre 116
  relais 81
  résistance 76
  transistor 111
syntaxe
  programmation 326
système
  à code 228
  de développement 300

T

table de vérité 221
temporisateur 555

guide d'achat 337
historique 175
transistorisé 116
verrou 173
test de continuité 68
testeur de réflexes 204
tolérance 27
tournevis miniature 57, 332
transistor
2N3904 335
amplificateur 131
amplification 112, 113
brochage 109
comparaison avec un relais 115
configuration à collecteur commun 129
configuration à émetteur commun 129
fonctionnement 110
gain en courant bêta 113
historique 115
interrupteur digital 113
introduction 108
NPN 110
origine 115
piloter le relais 233
PNP 111
remarques importantes 114
symbole 111
temporisateur 116
tresse à dessouder 136
troisième main 135, 331, 336
TTL Cookbook 263, 272

U

unités
multiplicateur 13

V

va et vient 71
verrou électronique 227, 310
verrouillage 239
Volta, Alexandre 38

W

Watt, James 47
Wheelers
formule 275

Z

zinc 38

Remerciements

De nombreuses personnes m'ont assisté durant l'écriture et la réalisation de ce livre. Je suis particulièrement reconnaissant envers David Cursons, Jolie de Miranda, Assad Ebrahim, Brian Good, Paul Henley, Brian Jepson, Roger Stewart et Frederick Wilson qui ont partagé leurs connaissances et m'ont signalé des erreurs. Merci également à Jeff Palenik pour son jeu sur la guerre de Sécession, et par-dessus tout à Frederik Jansson, le collaborateur le plus patient et perspicace qu'un auteur puisse souhaiter trouver.

La couverture et la quatrième de couverture ont été conçues par Julian Brown, qui m'a également prodigué ses conseils pour la préparation et la production de ce livre. La maquette intérieure ainsi que les photographies, schémas et visuel de couverture sont de Charles Platt.

Mon éditeur Patrick Dijusto m'a prodigué ses encouragements. Dale Dougherty et Gareth Branwyn m'ont accordé une liberté exceptionnelle pour l'écriture de la première édition de cet ouvrage, telle que je la souhaitais, avant même que quiconque n'ait entendu parler de « l'apprentissage par la découverte ».